



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática

PROYECTO FIN DE CARRERA

DEFINICIÓN DE TÍPICOS DE CONTROL PARA ACCIONAMIENTOS DE UN CICLO COMBINADO. SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN CON ECOSIMPRO

Autor: Amílcar San Gil Hernández

Tutor: Dr. Mohamed Abderrahim

Director: Luis Cerrada

Leganés, septiembre 2011

Título: Definición de típicos de control para accionamientos de un ciclo combinado.
Simulación e implementación con EcosimPro.

Autor: Amílcar San Gil Hernández

Tutor: Dr. Mohamed Abderrahim

EL TRIBUNAL

Presidente: Ramón Barber Castaño

Vocal: Beatriz López Boada

Secretario: Alberto Jardón Huete

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día __ de _____
de 20__ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de
Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Agradecimientos

Agradezco al departamento de Instrumentación y Control de Empresarios Agrupados, por toda la ayuda prestada y la información que he obtenido con su ayuda. Especialmente agradezco a mi tutor en la empresa, y director del departamento, Luis Cerrada, por no sólo haberme brindado la oportunidad de realizar este proyecto, sino de haber solucionado todas las dudas que he tenido a lo largo del mismo.

Sin la ayuda del departamento técnico de EcosimPro, Almudena, Fernando, Pepe, entre otros, no podría haber avanzado tan fluidamente como lo he hecho, y por ello también les doy las gracias.

En el ámbito académico, debo agradecer a mi tutor Mohamed Abderrahim, por su ayuda en cuestiones técnicas y en la elaboración del proyecto, así como del buen trato que me ha brindado desde que lo conocí como profesor.

Por último, quiero agradecer a todas aquellas personas que me han apoyado y sobretodo, sufrido, durante la realización de este proyecto fin de carrera, que cierra un ciclo tan importante para mí; especialmente agradezco a mi novia Sandra, mi madre Noor y Nasser.

Resumen

El presente proyecto definirá los típicos de control de una central de ciclo combinado en el software de simulación EcosimPro. El fin de estos típicos de control es el de gestionar todas las señales de los dispositivos de campo (accionamientos, transmisores, PLC's) controlando al mismo tiempo su actuación (arranque/parada de bombas, apertura/cierre de válvulas, etc) a través de un sistema de control distribuido (SCD).

Tras implementar los típicos de control (macros), se ha realizado un diseño del sistema físico de agua de alimentación, uno de los sistemas principales y más críticos en una central térmica. A este sistema físico, se le ha añadido posteriormente el control automático implementado también en EcosimPro, en el que previamente han sido integrados los típicos de control.

Por último, después de realizar simulaciones que verifiquen el correcto funcionamiento del sistema diseñado, se ha creado una interfaz gráfica en Excel, en la que se exporta toda la información desde EcosimPro. Ésto ofrece gran versatilidad y portabilidad al proyecto, pues permite su uso a personas sin conocimientos de EcosimPro y facilita la elaboración de informes más complejos.

Palabras clave: Sistema de control distribuido (SCD), Típicos de control (macros), accionamientos, interfaz gráfica, permisivos/disparos, simulaciones, ciclo combinado, válvula, motor, bomba.

Índice general

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.1 Contexto del proyecto	1
1.2 El papel del control en una central de ciclo combinado.....	3
1.3 Motivación del proyecto	7
1.4 Objetivos	8
1.5 Estructura de la memoria	9
2. SOFTWARE DE IMPLEMENTACIÓN.....	12
2.1 Introducción al software EcosimPro	12
2.2 Características principales.....	13
2.3 Librerías y componentes básicos usados.....	16
2.4 Entorno de simulación.....	21
3. COMPONENTES MECÁNICOS (SISTEMA DE AGUA DE ALIMENTACIÓN)	23
3.1 Objeto y alcance	23
3.2 Descripción general.....	24
3.3 Descripción del subsistema de media presión.....	25
3.4 Sistemas de soporte	27
3.5 Emergencia y permisos	28
3.6 Sistema implementado en EcosimPro	29
4. TÍPICOS DE CONTROL (DISEÑO DE LAS MACROS)	32
4.1 Macros de control.....	32
4.2 Macro del motor de media tensión (MMT).....	37
4.3 Macro de la válvula motorizada.....	45
4.4 Macro para la válvula solenoide fallo-cierre.....	51
4.5 Macro para la válvula de control.....	53
4.6 Macro para el grupo funcional	57
4.7 Macro para el selector de dos actuadores.....	60
5. CONTROL DEL SISTEMA.....	64
5.1 Aspectos generales del control.....	64
5.2 Control analógico y regulación	65

5.3 Control lógico.....	66
5.4 Unión del sistema mecánico y de control	73
6. SIMULACIONES	76
6.1 Resultados obtenidos.....	76
6.2 Disparo de la bomba activa	82
7. INTERFAZ GRÁFICA EN EXCEL.....	85
7.1 Interfaz gráfica	85
8. CONCLUSIONES.....	90
8.1 Conclusiones	90
8.2 Futuras mejoras y ampliaciones	92
9. PRESUPUESTO Y PLANIFICACIÓN	94
9.1 Memoria económica.....	94
9.2 Planificación.....	98
10. GLOSARIO.....	101
11. REFERENCIAS	102

Índice de figuras

Figura 1. Esquema de una central de ciclo combinado.....	3
Figura 2. Jerarquía de control	5
Figura 3. Librerías de EcosimPro	14
Figura 4. Barras de herramientas en EcosimPro	15
Figura 5. Representación esquemática en EcosimPro	15
Figura 6. Componentes de la librería de control.....	17
Figura 7. Componentes de la librería FluidaPro	18
Figura 8. Componentes de la librería mecánica.....	20
Figura 9. Componentes de la librería puertos	20
Figura 10. Esquema del sistema de agua de alimentación.....	25
Figura 11. Sistema de agua de alimentación en EcosimPro	29
Figura 12. Comunicaciones entre SCD, macros y accionamientos	33
Figura 13. Símbolo de la macro MMT	37
Figura 14. Opciones de control de la macro MMT.....	39
Figura 15. Esquemático de la macro MMT	40
Figura 16. Símbolo de la macro de la válvula motorizada.....	45
Figura 17. Esquemático de la macro de la válvula motorizada	46
Figura 18. Símbolo de la macro de la válvula solenoide fallo-cierre	51
Figura 19. Esquemático de la macro de la válvula solenoide fallo-cierre	52
Figura 20. Símbolo de la macro de la válvula de control	53
Figura 21. Esquemático de la macro de la válvula de control	54
Figura 22. Símbolo de la macro del grupo funcional.....	57
Figura 23. Esquemático de la macro del grupo funcional.....	58
Figura 24. Símbolo de la macro del selector de dos actuadores	60
Figura 25. Esquemático de la macro del selector de dos actuadores	61
Figura 26. Jerarquía del control del sistema de agua de alimentación.....	67
Figura 27. Símbolo de la lógica para una línea del sistema	69
Figura 28. Esquemático de la lógica de una línea.....	70
Figura 29. Lógica global del sistema de agua de alimentación	71

Figura 30. Lógica de control y sistema mecánico.....	73
Figura 31. Simulación del arranque del sistema	77
Figura 32. Caudal de salida de la bomba 1	78
Figura 33. PID de la válvula de recirculación.....	79
Figura 34. Demanda variable hacia el calderín de PI	80
Figura 35. Caudal de recirculación	81
Figura 36. Disparo de la bomba activa y arranque de la bomba de reserva.....	83
Figura 37. Interfaz gráfica en Excel.....	87
Figura 38. Detalles de las bombas en Excel.....	88
Figura 39. Exportar datos desde EcosimPro hacia Excel.....	89
Figura 40. Diagrama de Gantt de la planificación del proyecto	100

Índice de tablas

Tabla 1. Costes de personal.....	95
Tabla 2. Costes de equipo	96
Tabla 3. Presupuesto total del proyecto	97
Tabla 4. Glosario	101

Capítulo 1

Introducción y objetivos

1.1 Contexto del proyecto

La generación de electricidad es uno de los campos donde la ingeniería ha avanzado más solidamente en las últimas décadas. Explotar los recursos naturales de la tierra de la manera más eficiente e intentando que sea de la forma más sostenible posible y menos agresiva para el planeta, es en sí un reto de la ingeniería moderna que no ha hecho sino comenzar.

Este proyecto se centra en un tipo de central eléctrica concreta, las centrales de ciclo combinado. Bajo este nombre se engloban las centrales que emplean gas natural como combustible y que para generar electricidad utilizan la tradicional turbina de vapor y una turbina de gas que aprovecha la energía de los gases de escape de la combustión. Los rendimientos termoelectricos en este tipo de centrales rondan el 55%, muy por encima de las plantas convencionales.

Además de este elevado rendimiento, hay más factores que hacen que estas centrales hayan tenido gran auge en la pasada década y sigan siendo una de las principales referencias en cuanto a la generación de energía en el presente. Entre ellos destacan el reducido coste de instalación en comparación a otras centrales, la alta disponibilidad que ofrecen, ya que pueden funcionar sin problemas durante 6500-7500 horas equivalente al año y su relativamente bajo impacto ambiental. En este aspecto, se alude principalmente al vertido casi nulo de Dióxido de Azufre y a los bajos vertidos de Dióxido de Carbono frente a las centrales convencionales térmicas de carbón.

Según el libro “*La energía y el medio ambiente*” [1], en el actual escenario de la generación eléctrica a nivel mundial, el gas natural será la energía cuya demanda experimentará un mayor aumento, llegando a alcanzar una participación del 23% en el balance mundial del consumo de energías primarias.

En la siguiente figura se muestra un esquema que resume los sistemas principales de una central térmica de ciclo combinado. Nuestro proyecto se centra exclusivamente en el sistema de agua de alimentación, cuyo objetivo principal es el de bombear agua desde el calderín de baja presión hacia los calderines de presión intermedia y alta presión, para la posterior generación del vapor que finalmente será introducido en la turbina de vapor, donde se transformará esta energía en electricidad.

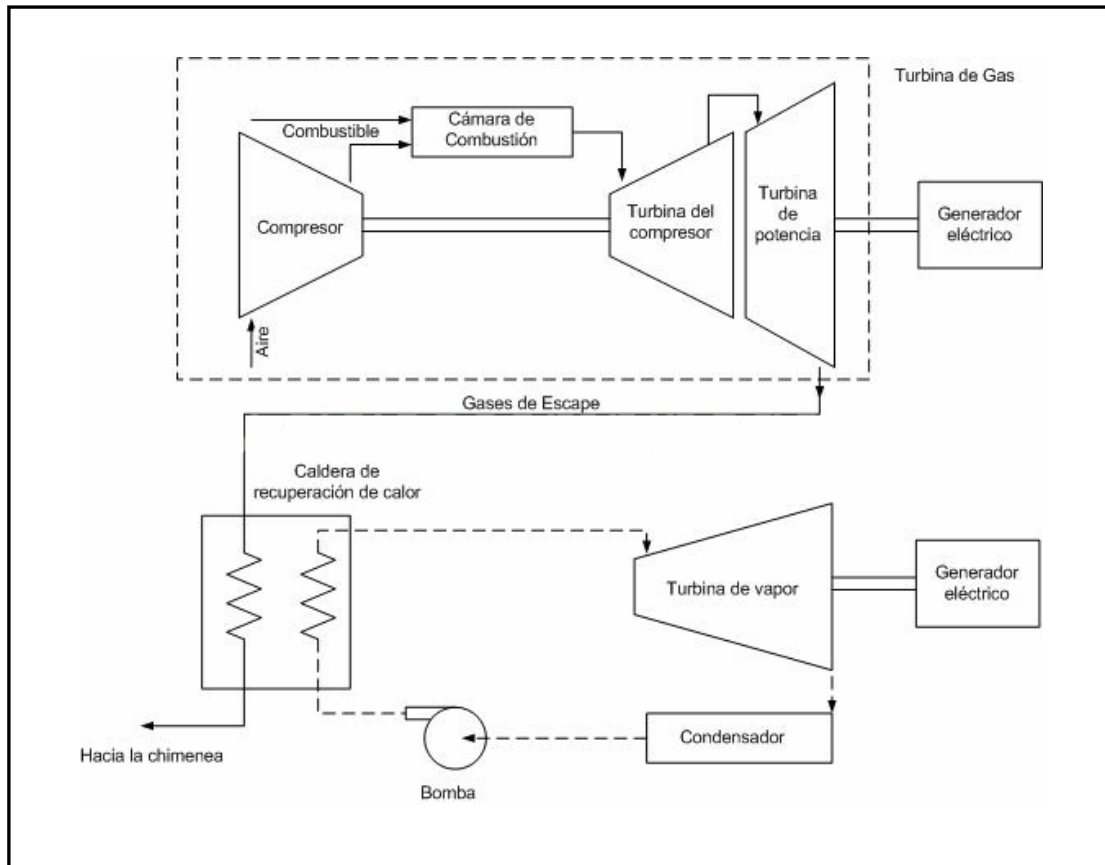


Figura 1. Esquema de una central de ciclo combinado

Se explicará con detalle en capítulos posteriores, pero el sistema de agua de alimentación es uno de los más importantes de una central térmica, y posee interfaces críticas con sistemas también principales como son el de condensado y la caldera de recuperación de calor (HRSG: Heat Recovery Steam Generator).

1.2 El papel del control en una central de ciclo combinado

Una central térmica, de cualquier tipo, está compuesta por una cantidad elevada de sistemas principales y subsistemas, muchos de ellos críticos para el funcionamiento de la misma. Es por tanto un factor clave, garantizar una respuesta rápida y fiable a cada una de las distintas situaciones que pudieran acontecer en el seno de la central. La seguridad y la eficiencia en una central, no se basa exclusivamente en disponer de los mejores equipos mecánicos que haya en el mercado, sino de gestionarlos y controlarlos

adecuadamente. Es justo en ese punto, donde se centra la instrumentación y el control. Las tareas que debe realizar el departamento de instrumentación y control incluyen la selección de los elementos de medida, válvulas mecánicas, sistemas de control distribuido, interfaces con el operario, realización de diagramas lógicos, además de realizar el cableado desde el SCD hasta todos los elementos de campo e incluso plantas paquete. Estas plantas paquete son subsistemas no críticos que se implementan en un PLC (Controlador lógico programable) externo, y posteriormente se comunica con el SCD.

Las centrales térmicas son un ámbito complejo, donde se requieren objetivos de automatización que entran mutuamente en conflicto. Para que el funcionamiento global sea flexible y no admita errores, se necesitan sistemas de automatización a gran escala, bien organizados y de una alta complejidad como son los sistemas de control distribuido (SCD). Su objetivo es recibir y analizar la mayor cantidad posible de información de la central, para posteriormente enviar las correspondientes órdenes a los distintos actuadores que componen el conjunto de la central.

La complejidad de la estructura jerárquica de los automatismos de una planta industrial se agrava aún más debido a que la mayoría de sistemas y subsistemas implicados están organizados jerárquicamente.

El SCD se encuentra en un nivel intermedio, gestionando toda la información que le llega de campo a través de los transmisores (de presión, caudal, temperatura, etc.) y de los propios actuadores (bombas, válvulas, ventiladores, etc.). El SCD procesa toda esta información, y controla el sistema automáticamente según se haya programado previamente.

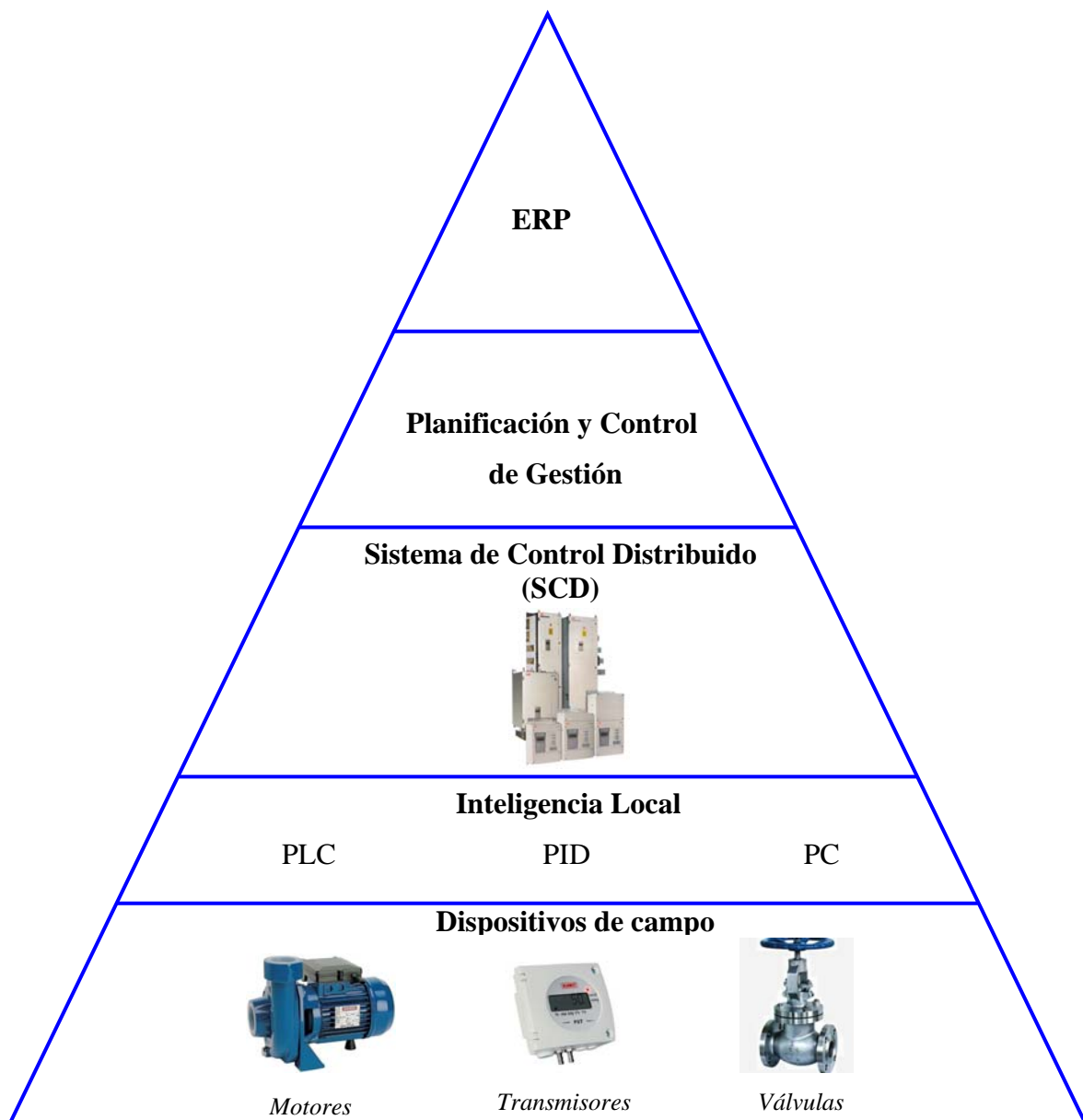


Figura 2. Jerarquía de control

La información desde el nivel de campo se puede transmitir al SCD de dos formas: cableada o comunicada. Para señales críticas y de gran importancia, se suele emplear una filosofía que recomienda que estas señales sean transmitidas por cable, conectando directamente los transmisores y actuadores con el SCD físicamente con un cable. El SCD está dotado con regleteros de tarjetas de entrada y salidas de señales digitales y analógicas. Las señales digitales tienen una tensión continua de 24 V, mientras que las señales analógicas se transmiten en un rango de corriente de 4-20 mA. La otra manera de transmitir la información, es a través de ModBus. Modbus es un protocolo de

comunicaciones de bus de campo y se basa en una arquitectura maestro/esclavo. Es un estándar en todo tipo de industrias, pues goza de mayor disponibilidad para la conexión con dispositivos electrónicos industriales. Las principales razones por las que Modbus es la mejor alternativa frente a otros protocolos de comunicación son:

- Es público.
- Se implementa fácilmente requiriendo poco desarrollo.
- Puede gestionar bloques de datos sin imponer restricciones.

Modbus ofrece también la posibilidad de controlar una red de dispositivos y comunicar los resultados a un ordenador principal, que en nuestro caso sería el sistema de control distribuido. Este protocolo además ofrece la posibilidad de conectar los dispositivos por cable, *wireless*, SMS o GPRS.

En ocasiones, una misma señal se puede transmitir cableada o por Modbus. Esta redundancia garantiza que tras un fallo en las comunicaciones el sistema no pierda esa información. Esta práctica sólo es válida en sistemas críticos y de gran importancia.

No se debe olvidar, que aunque en condiciones estacionarias y sin ninguna situación de emergencia la central es controlada en su totalidad por el SCD, en todo momento debe haber un operador en la sala de control, monitorizando los sistemas y la información que le llega del nivel de campo. Este operador no sólo puede monitorizar, sino que si lo creyese conveniente podría tomar el control de los sistemas que lo requiriesen, rechazando el modo de operación de los mismos a manual. En ese instante, las órdenes que proviniesen del SCD para estos sistemas, serían ignoradas.

Para profundizar más en la estructura interna de un SCD, o de cualquier PLC en general, y así poder obtener la mejor filosofía para programarlo, podemos utilizar el libro “*Computer-Aided manufacturing*” [2].

1.3 Motivación del proyecto

Este proyecto se ha desarrollado durante las prácticas que el alumno ha realizado en la empresa Empresarios Agrupados, en el departamento de Instrumentación y Control. El tutor en la empresa, y también director del departamento, creyó conveniente implementar y simular el control del sistema de agua de alimentación que hasta la fecha se programaba directamente en los SCD, en el software de simulación EcosimPro.

Las ventajas que ofrecería para el departamento tener todos los sistemas que componen un ciclo combinado implementados en dicho software, son principalmente la posibilidad que ofrece de poder saber el comportamiento real que tendrá en el sistema la lógica desarrollada en el trabajo. De esta manera, se podrían corregir los parámetros necesarios, antes de programar este control en el SCD, en las FAT (Factory Acceptance Test), que como su nombre indica, es el proceso en el cual se carga toda la lógica programada en la empresa, en el SCD.

Por parte del alumno, se adquiere experiencia con un software de simulación nuevo, además de un mayor conocimiento de los detalles más precisos de uno de los sistemas más críticos de una central de ciclo combinado; el sistema de agua de alimentación. Para ello, se ha intercambiado información con otros departamentos internos de la empresa, además de disponer del conocimiento y de la experiencia de los distintos profesionales que componen el departamento de Instrumentación y Control.

1.4 Objetivos

El objetivo principal consiste en la simulación y diseño de los típicos de control para los actuadores y la posterior simulación del sistema de control para el sistema de agua de alimentación de una central de ciclo combinado. Por lo tanto, los objetivos del proyecto se dividen en las siguientes etapas:

- Adquirir experiencia con el simulador EcosimPro. Para ayudar a este fin, se ha asistido a un curso de formación impartido por la empresa, además de disponer de la ayuda del departamento técnico del software.
- Implementación de los siguientes típicos de control: Motor de media tensión, válvula motorizada, válvula solenoide fallo-cierre, válvula de control, grupo funcional y selector de dos actuadores. Se parte de la experiencia del tutor de proyecto además de información en la red interna de la empresa sobre típicos de control implementados para otros proyectos.
- Diseño y simulación del sistema de agua de alimentación, tanto la parte mecánica como su sistema de control. Se realiza énfasis en el control de este sistema, al formar parte de la especialidad que se estudia en la carrera (Automática y Electrónica Industrial).
- Simulación del sistema total de agua de alimentación, incluyendo situaciones críticas reales en una central de ciclo combinado.
- Creación de una interfaz gráfica en Microsoft Excel, exportando los datos y la simulación desde EcosimPro y programando instrucciones en Visual Basic. Esto se asemeja más a la realidad de una central térmica, en la que se dispone de una sala de control con una interfaz gráfica, y además permitirá el uso del proyecto a personas sin conocimientos de EcosimPro.

1.5 Estructura de la memoria

La presente memoria se desglosa en capítulos, cada uno de ellos centrado en un aspecto en concreto del proyecto.

En el *primer* capítulo se ha introducido el proyecto en el contexto de la generación de energía en centrales térmicas de ciclo combinado. Se explican los conceptos básicos sobre un sistema de control distribuido y las formas de comunicar la información desde los instrumentos de campo hasta el SCD.

La introducción y exposición de las principales características al software de simulación EcosimPro, se realizan en el *segundo* capítulo. Sin entrar en excesivo detalle, se muestra la forma que tiene este software para simular todo tipo de sistemas y procesos industriales.

El *tercer* capítulo describe el sistema de agua de alimentación, desde un punto de vista mecánico, la función que cumple y los actuadores que lo componen. Se aporta información sobre los sistemas de los que dependen y sus interfaces en la central.

En el *cuarto* capítulo se muestran los típicos de control (macros) que se han implementado en EcosimPro, así como una descripción de su lógica interna. Se exponen las ventajas y el papel que representan en el control automático de una industria de estas características.

El control del sistema de agua de alimentación se expone en el capítulo *cinco*, donde se integran las macros a la lógica final. Se justifica la elección del control realizado y se muestran las situaciones críticas que permite resolver, así como su funcionamiento en estado estacionario (sin anomalías).

Una vez se han presentado el control del sistema y su composición mecánica, se procede a unirlos en el EcosimPro y analizar si funciona correctamente, y el sistema es controlado como se desea. Se presentan una serie de simulaciones de situaciones comunes y críticas en el capítulo *seis*.

El *séptimo* capítulo consta de una interfaz gráfica realizada en Excel, con una programación básica en Visual Basic. Compone una idea de las vistas que tendría el operario en una sala de control central.

Las conclusiones y futuras ampliaciones del proyecto fin de carrera, forman el *octavo* capítulo de la presente memoria. En él se redacta el análisis que se ha obtenido con la realización de este proyecto, y de qué manera podría ampliarse o mejorarse.

Por último, en el capítulo *noveno*, se muestra una guía de los pasos que se han seguido y las fechas que abarcan en un Diagrama de Gantt, además del presupuesto que supone llevar a la práctica este proyecto.

Capítulo 2

Software de implementación *EcosimPro*

2.1 Introducción al software EcosimPro

EcosimPro es un software que permite modelar y simular sistemas continuos y discretos. Ofrece la posibilidad de estudiar detalladamente los regímenes transitorios y estacionarios de cualquier sistema que implementemos.

El concepto principal de EcosimPro es la reutilización de componentes previamente creados sin tener que reprogramarlos de nuevo, ahorrando gran cantidad de tiempo. Posee un entorno gráfico muy intuitivo que ayuda a visualizar de manera sencilla el diseño y las simulaciones que se implementen.

Ofrece también la posibilidad de utilizar gran variedad de lenguajes de programación existentes como C, C++ o Fortran, generando a su vez código C++ con el modelo final que simulemos.

EcosimPro utiliza potentes revolvedores de ecuaciones algebraicas y diferenciales que permiten trabajar con miles de ecuaciones al mismo tiempo.

2.2 Características principales

La manera que se ha empleado de crear nuestro sistema, ha sido utilizando sus herramientas gráficas, que han permitido utilizar componentes previamente creados en sus librerías y crear los míos propios utilizando como base los originales del programa.

Los componentes en EcosimPro se agrupan en librerías que encierran características muy concretas. Así por ejemplo se puede encontrar librerías de control, de componentes hidráulicos, de modelos matemáticos, etc.

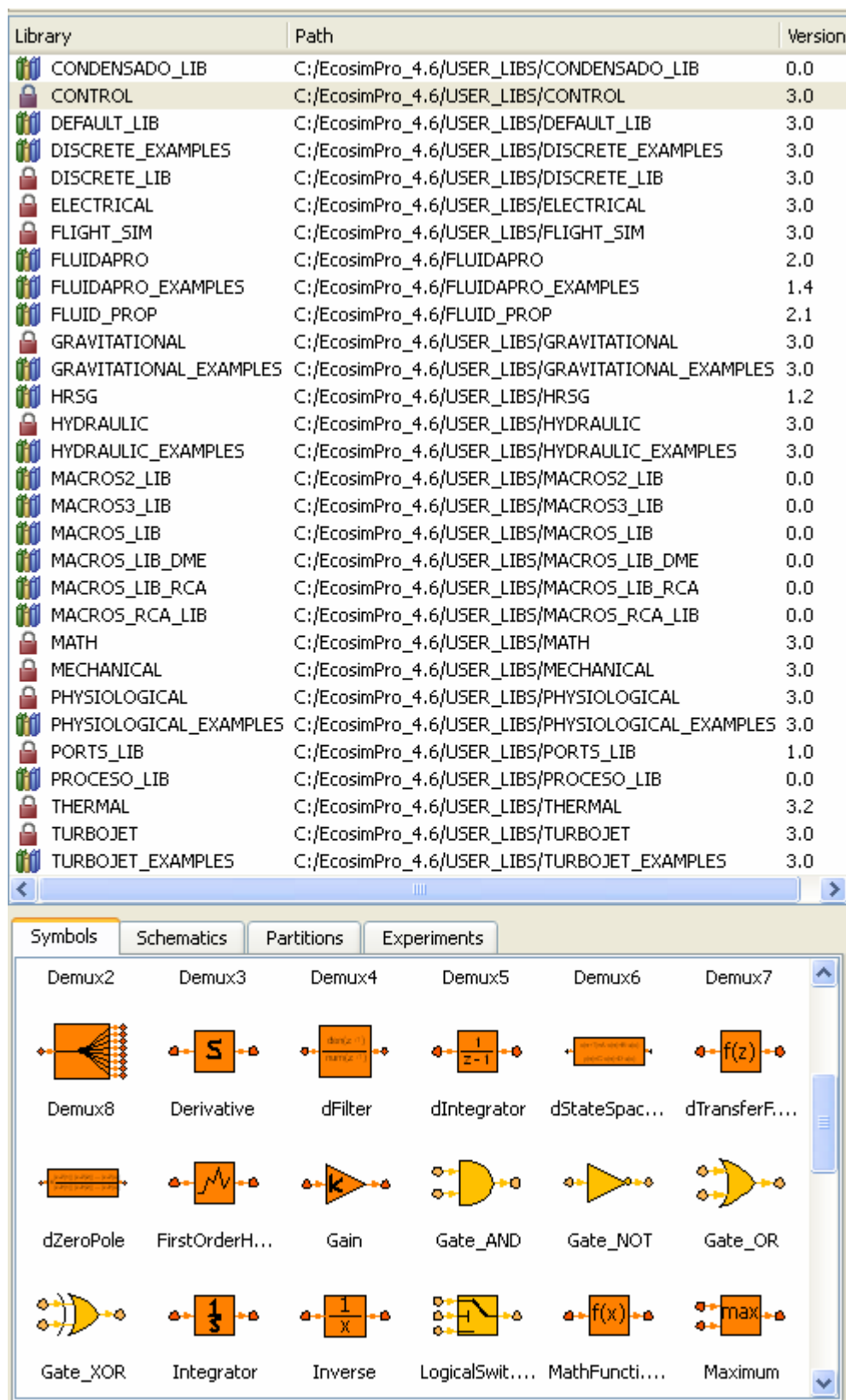


Figura 3. Librerías de EcosimPro

Se debe distinguir dos formas de usar estas librerías de componentes en EcosimPro: desde la vista esquemática (schematic view) y la vista de código (code view).



Figura 4. Barras de Herramientas en EcosimPro

Por lo tanto hay dos formas de definir y crear un nuevo componente, con código, o usando componentes ya creados, arrastrarlos a una hoja esquemática y unirlos correspondientemente a la función que queramos crear. Se muestra a continuación, la forma en la que hemos creado una puerta lógica OR de cuatro entradas, una de ellas negada, partiendo de componentes creados ya en EcosimPro.

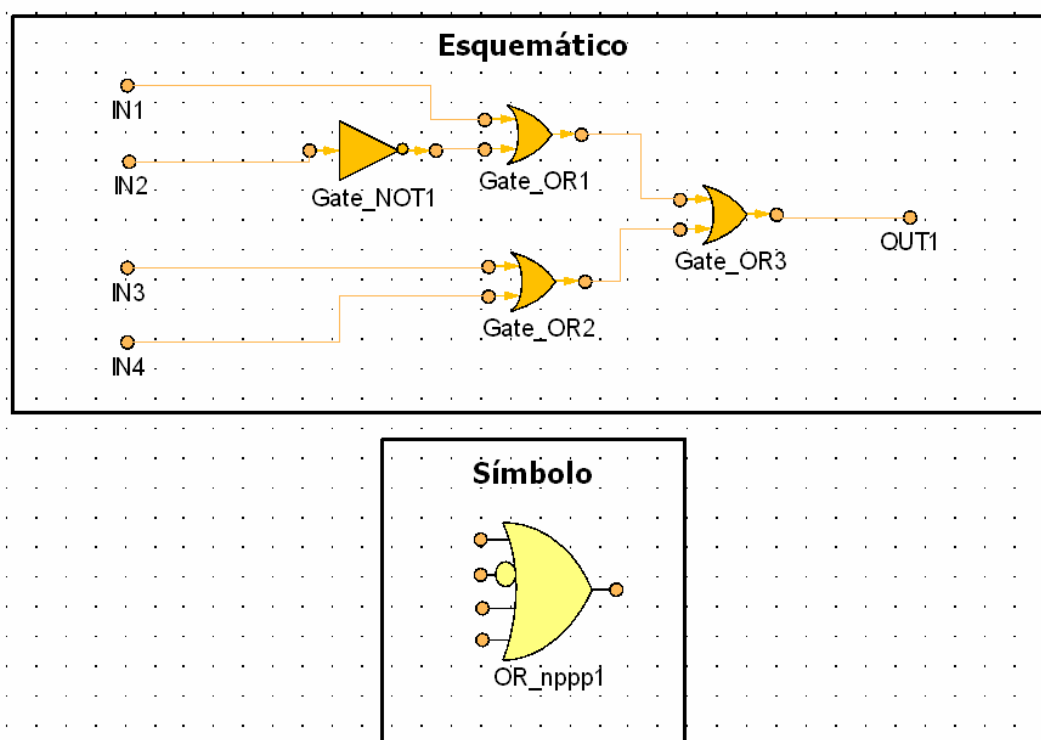


Figura 5. Representación esquemática en EcosimPro

En la figura 5 se muestra como partiendo de componentes que ya estaban creados, se ha unido adecuadamente, y formado un nuevo componente al que se ha llamado OR_nppp, y se ha creado un nuevo símbolo que será utilizado en el futuro diseño.

De igual manera, este componente se podría haber creado, escribiendo el siguiente código en el modo de vista de código:

```

USE CONTROL VERSION "3.0"
USE PORTS_LIB VERSION "1.0"
COMPONENT OR_nppp
PORTS
IN PORTS_LIB.bool_signal(
n = 1) IN1
IN PORTS_LIB.bool_signal(
n = 1) IN2
IN PORTS_LIB.bool_signal(
n = 1) IN3
IN PORTS_LIB.bool_signal(
n = 1) IN4
OUT PORTS_LIB.bool_signal(
n = 1) OUT1
TOPOLOGY
CONTROL.Gate_OR Gate_OR1
CONTROL.Gate_OR Gate_OR2
CONTROL.Gate_OR Gate_OR3
CONTROL.Gate_NOT Gate_NOT1
CONNECT Gate_OR1.s_out TO Gate_OR3.s_in_1
CONNECT Gate_OR2.s_out TO Gate_OR3.s_in_2
CONNECT Gate_NOT1.s_out TO Gate_OR1.s_in_2
CONNECT Gate_OR1.s_in_1 TO IN1
CONNECT Gate_NOT1.s_in TO IN2
CONNECT Gate_OR2.s_in_1 TO IN3
CONNECT Gate_OR2.s_in_2 TO IN4
CONNECT Gate_OR3.s_out TO OUT1
END COMPONENT

```

2.3 Librerías y componentes básicos usados

2.3.1 Librería de Control

En la librería de control se encuentran los componentes relacionados con la electrónica, tanto digital como analógica. Se puede encontrar desde puertas lógicas (AND, NOT, OR, etc.), hasta amplificadores operacionales. También dispone de operadores aritméticos para señales (sumadores, restadores, multiplicadores) y de funciones típicas como retrasos o ganancias.

En la siguiente imagen se muestran algunos de los componentes principales que se han utilizado en este proyecto y que forman parte de esta librería de control.

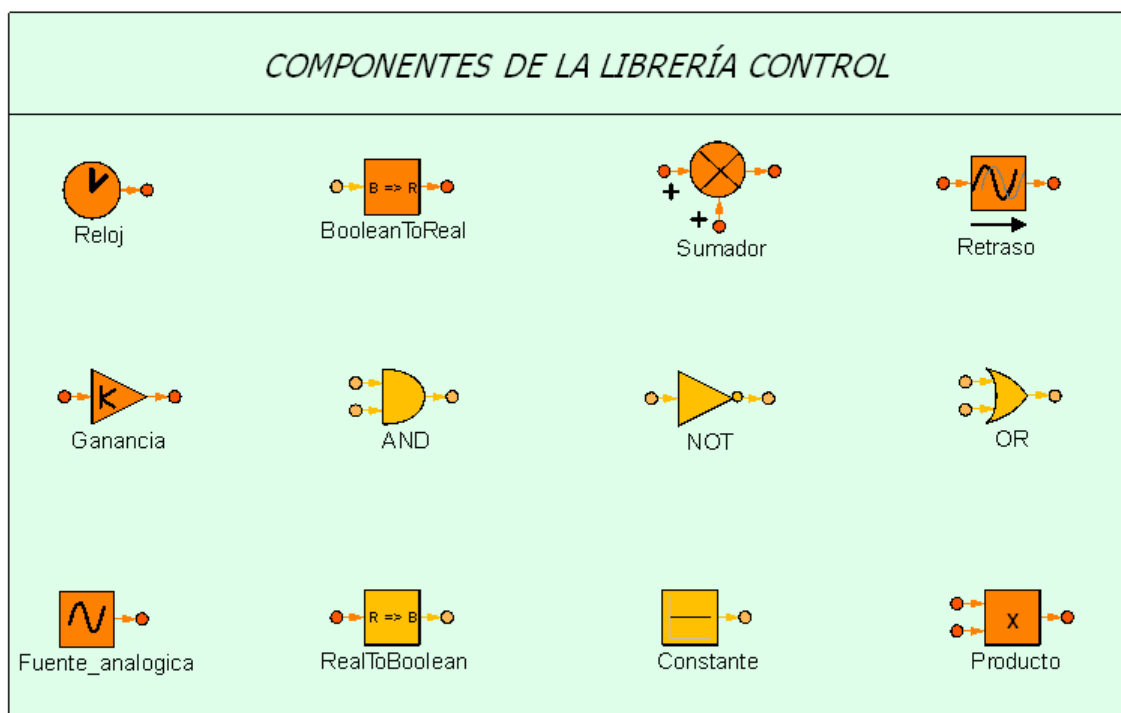


Figura 6. Componentes de la librería de control

2.3.2 Librería FluidaPro

La librería FluidaPro podría considerarse un software propio dentro de EcosimPro. Se trata de una librería que sirve para la simulación dinámica de sistemas fluidos en distintas fases: líquida, vapor y/o mezcla bifásica. Así mismo incluye la posibilidad de realizar cálculos de transferencia de calor, distintos tipos de actuadores neumáticos e hidráulicos, así como incluir cualquier tipo de elemento mecánico por cuyo interior circule algún fluido.

Para adaptarse a esta librería hay que cambiar la filosofía de trabajo en EcosimPro, y asimilar una serie de restricciones que no se imponen con otras librerías de trabajo. Sin embargo, el grado de realismo que se llega a alcanzar en las simulaciones concuerda sobresalientemente con la realidad.

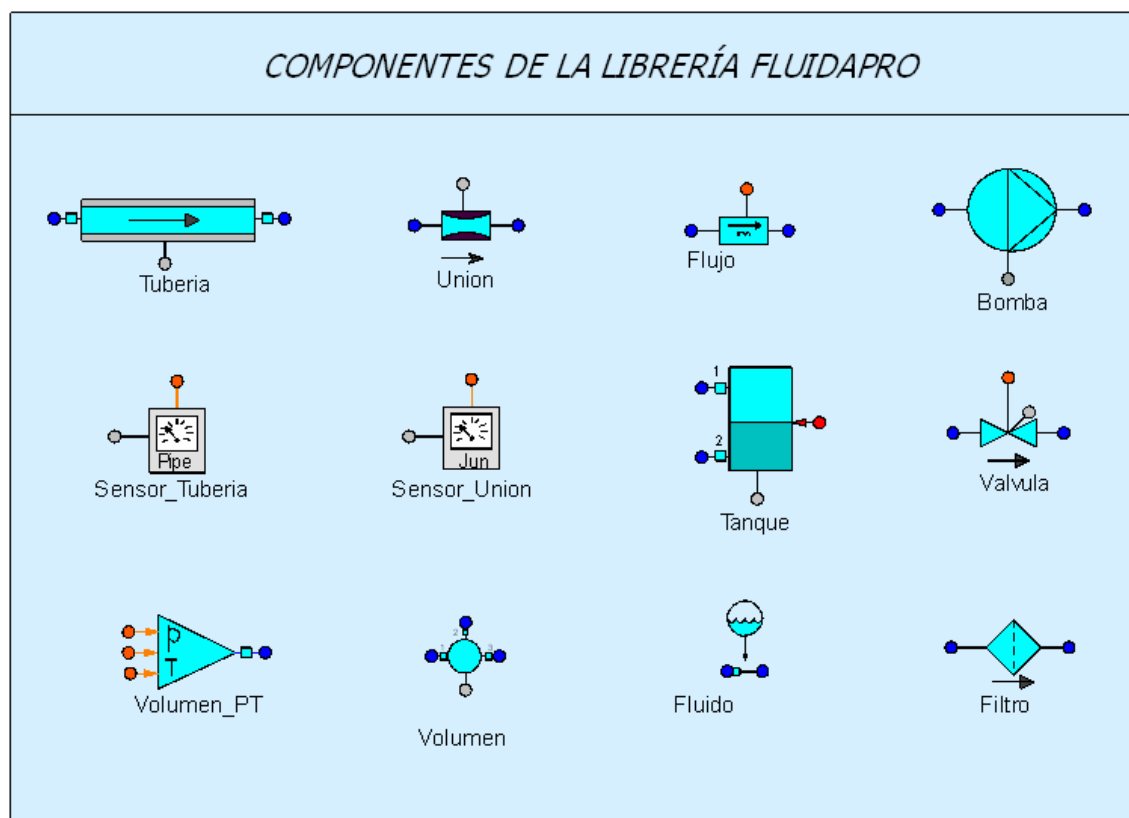


Figura 7. Componentes de la librería FluidaPro

En la figura 7 se muestran los componentes que se han usado de la librería FluidaPro, y a continuación se dará una corta descripción de cada uno de ellos. Se podría distinguir entre dos grupos de componentes dentro de la librería FluidaPro, y se puede distinguir en la imagen por la terminación de su conector (si disponen de un cuadrado azul-claro antes del puerto conector o no). Unos calculan el caudal que circula a través de ellos (por ejemplo las uniones) y otros calculan la presión en su interior (por ejemplo una tubería). En los componentes donde se calcula la presión se obtiene simultáneamente el estado termodinámico del fluido. Para que esto no sea un problema de cálculo en los instantes iniciales de la simulación, se dan unos datos de partida para cada componente (normalmente presión, temperatura o volumen de fluido) que ayudan a la simulación en los primeros pasos de la misma. Al crear un modelo en EcosimPro con estos componentes, deben intercalarse los de un grupo con los del otro, para que el sistema sea coherente y no de fallos de compilación.

- **Unión:** Es una restricción, que calcula el caudal que circula a través de la misma por diferencia de presión entre sus extremos.

- **Flujo:** Se trata de una restricción dónde nosotros imponemos el caudal que deseemos.
- **Válvula:** Es la representación de una válvula, que podría ser considerado como un orificio cuya área variamos según deseemos.
- **Volumen_PT:** Es un bloque que permite que impongamos como condiciones de contorno la temperatura y la presión.
- **Tubería:** Es la representación de una tubería. Está formada por unos nodos (componentes en los que se calcula la presión) y uniones (componentes en los que se calcula el caudal) intercalados en su interior. Se puede definir el número de nodos que queremos que componga la tubería y así extraer el máximo de información posible de la misma.
- **Volumen:** Es un componente con un volumen fijo en el cual se calcula la presión en el interior partiendo de los caudales de entrada y salida.

2.3.3 Librería Mecánica

Aunque la librería mecánica ofrece gran cantidad de componentes relacionados con la transmisión de energía en forma mecánica, nuestro uso de la misma se ha limitado a transmitir un par mecánico que simule el motor que actúa las bombas del sistema de agua de alimentación. En la siguiente figura se muestran algunos ejemplos de componentes de esta librería.

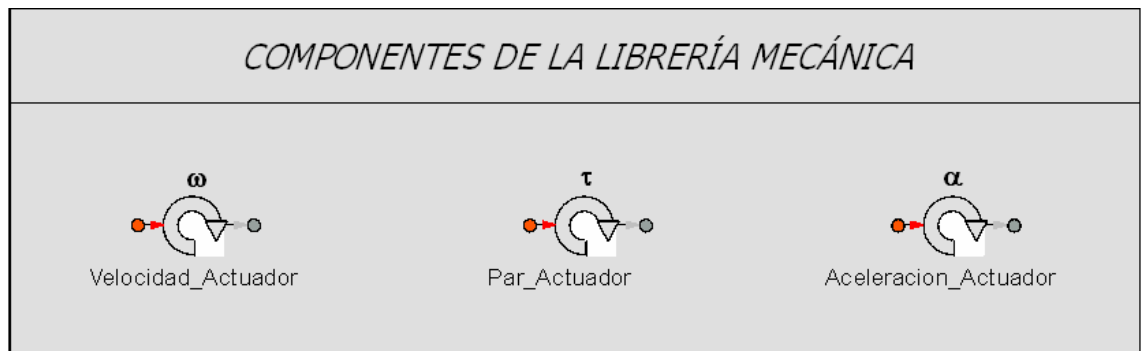


Figura 8. Componentes de la librería mecánica

2.3.4 Librería Puertos

En EcosimPro se debe respetar la naturaleza de todas las señales. Por lo tanto, cada sistema físico tiene sus propios puertos. Así por ejemplo, si intentáramos conectar una señal booleana lógica (un “0” o un “1”) a un puerto mecánico, el sistema nos avisaría de que hay un error. Los colores propios de cada tipo facilitan la tarea al implementar grandes sistemas.

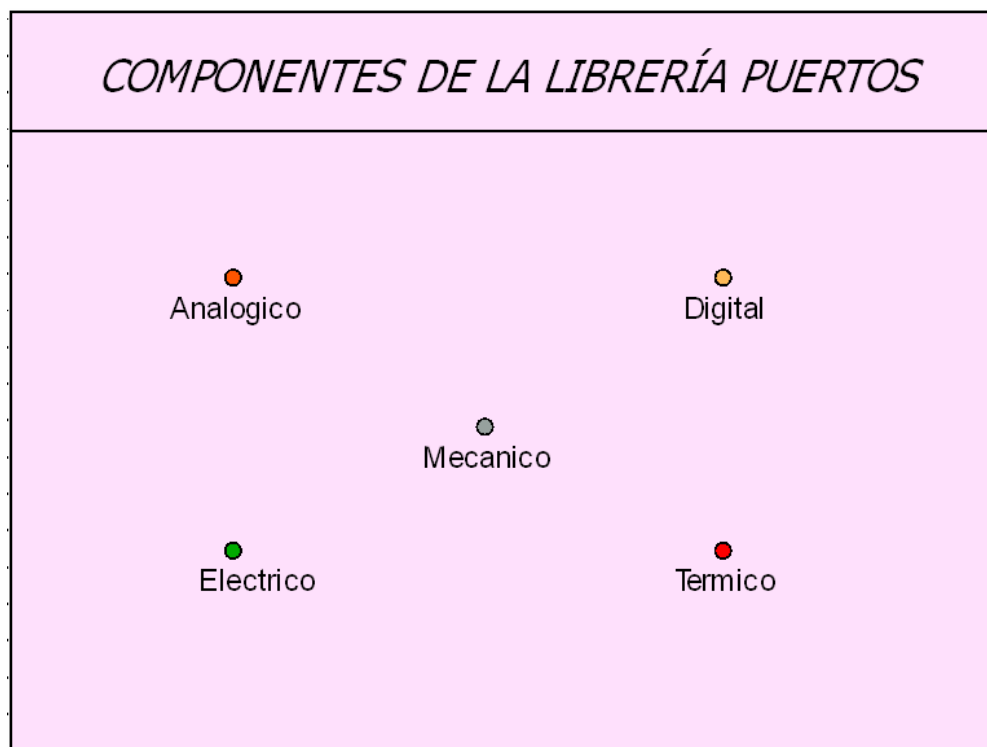


Figura 9. Componentes de la librería puertos

2.4 Entorno de simulación

Una vez se tiene un diseño creado en un esquemático, se compila el objeto y se forma una partición. Esta partición es un modelo matemático de nuestro diseño, que ordena las ecuaciones que lo rigen a través de una secuencia de cálculo según qué condiciones de contorno se hayan seleccionado.

Es en este momento donde se crea un experimento y se define los valores iniciales de las variables de entorno, así como de cualquier variable que se quiera del sistema. En este fichero de texto que sirve de experimento se pueden además definir condiciones variables para las variables, así como rampas de subida para un caudal de entrada, o el reseteo de una señal a partir de un instante de tiempo determinado.

EcosimPro resuelve sistemas de ecuaciones tanto algebraicas como diferenciales. Para resolver los regímenes transitorios se utilizan algoritmos de integración DASSEL, que selecciona el intervalo de integración automáticamente y algoritmos Runge-Kutta de orden 4. Para las ecuaciones algebraicas se utilizan Minpack y Newton-Raphson.

En nuestras simulaciones, hemos utilizado el algoritmo de integración DASSEL con un error relativo y absoluto de $1e-04$, pues se adapta mejor a sistemas con dinámicas rápidas.

Capítulo 3

Componentes Mecánicos

Sistema de Agua de Alimentación

3.1 Objeto y alcance

La función principal del sistema de agua de alimentación es aportar agua, tras su previo calentamiento en los economizadores, a los calderines de alta y media presión para que allí se produzca el vapor de alta y media presión. Se regulará el caudal de aporte a los calderines para garantizar unos límites de nivel en ellos.

El sistema de agua de alimentación, principalmente, aporta agua a dos de los tres calderines de la HRSG (Heat Recovery Steam Generator, en español se conoce como caldera de recuperación de calor). Para realizar esta función dispone, por cada caldera, de dos bombas del 100% de capacidad para el circuito de alta presión (AP) y otras dos bombas del 100% de capacidad para el circuito de media presión (MP). Cada una de las bombas está protegida por una línea de mínima recirculación con una válvula de control

que se controla con la señal de un transmisor de caudal a la descarga de las bombas. Todas las bombas aspiran del calderín de baja presión (BP).

3.2 Descripción General

El sistema de agua de alimentación debe suministrar agua a los calderines de media y alta presión, con dos bombas del 100% de capacidad para cada calderín. Para el aporte de agua a cada uno de los calderines, se dispone de dos líneas, cada una de ellas dotada de una bomba y una válvula de control de mínima recirculación. En condiciones de operación estacionarias, sólo operará una de las líneas para cada calderín, manteniendo en stand-by (reserva) a la otra línea. Las bombas de capacidad 100% deben ser capaces de operar sin apoyo de la segunda bomba redundante, que estaría apagada y sólo entraría en funcionamiento si la bomba seleccionada como prioritaria tuviera alguna anomalía. Las bombas se encuentran a nivel del suelo (elevación 0 metros) en las casas de bombas de agua de alimentación, mientras que los calderines se encuentran sobre una plataforma a una altura de 30 metros. En el diseño de las bombas se ha tenido en cuenta que puedan dar la suficiente altura para alimentar a los calderines en las condiciones de máxima presión que operan los mismos.

Podemos por tanto, dividir el sistema de agua de alimentación en dos subsistemas, el sistema de alta presión y el de media presión. El alcance de este proyecto, se ha limitado al diseño del subsistema de media presión, entendiendo que para simular el sistema completo, sólo haría falta copiar y duplicar el sistema de media presión, modificando algunos parámetros mecánicos como por ejemplo diámetro de tuberías, secciones de válvulas y lo más importante, las presiones a las que opera el calderín de alta presión. En cuanto al control, no habría cambios respecto al control que se ha implementado para el sistema de media presión, siendo éste mismo totalmente válido.

3.3 Descripción del subsistema de media presión

Este apartado se centra en explicar el funcionamiento del subsistema de media presión, que es el objetivo del proyecto. La figura 10 es un esquema que caracteriza a los principales componentes.

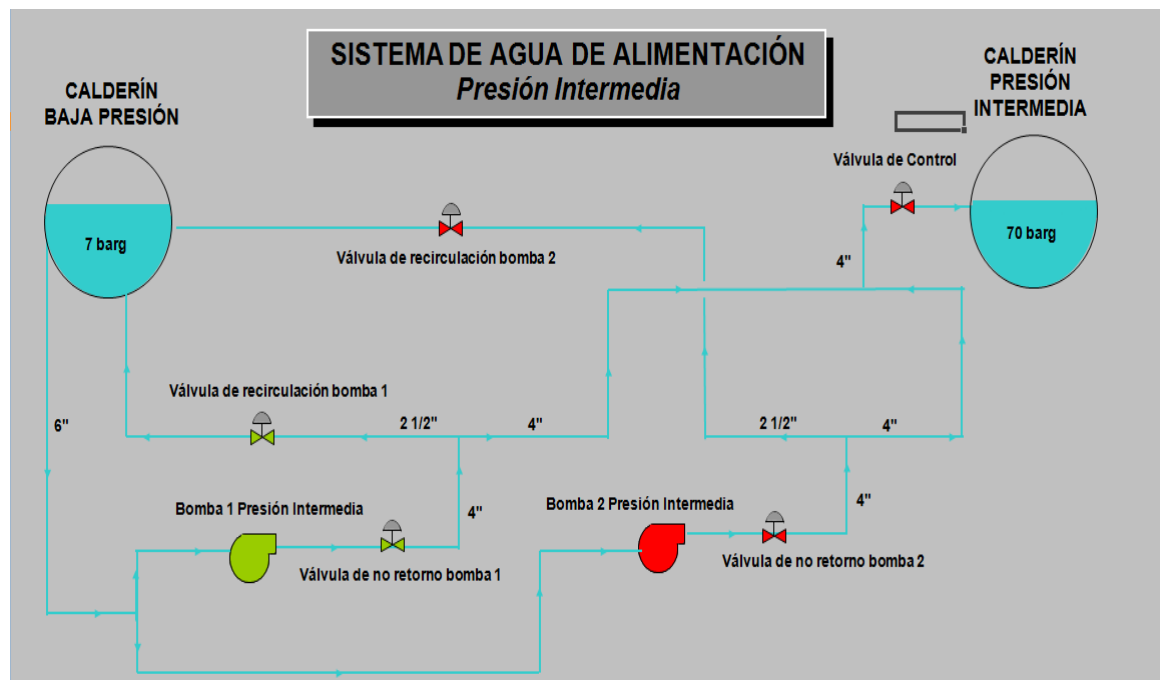


Figura 10. Esquema del sistema de agua de alimentación

En el subsistema de media presión, se bombea agua desde el calderín de baja presión, que se encuentra a una presión estable de 7 bares, hasta la entrada del economizador de media presión, para posteriormente ser introducida en el calderín de media presión, que se encuentra en una presión de 70 bares, donde se procederá a la vaporización. Como ya se ha explicado, se dispone de dos bombas, del 100% de capacidad. Cada una de las bombas aspira del calderín de baja presión por medio de una línea independiente de 6". Estas líneas incorporan transmisores de presión y de temperatura. Cada bomba descarga en una tubería de impulsión de 4" en la que hay

instalado un transmisor de presión y de caudal. Este transmisor de caudal, será el que envíe la señal a la válvula de control encargada de realizar la mínima recirculación. La naturaleza de estos transmisores, aunque su estudio no es objeto del presente proyecto, se recoge en el libro titulado “*Instrumentación aplicada a la ingeniería*” [3]. En él se pueden obtener las ecuaciones características de los fenómenos físicos que rigen estos transmisores, así como de las variables en que se basa cada uno de ellos.

La línea de recirculación al calderín de baja presión es de 2,5” y está dotada de una válvula de control de caudal. El fin de esta línea de recirculación es garantizar que la bomba opere con un caudal mínimo por debajo del cual debiera pararse pues no sería seguro que operara con tan bajos caudales. Al arrancar las bombas, en un estado inicial en el que la demanda de agua de aporte al calderín de media presión fuera nula, la bomba descargaría un caudal de 13 kg/s (valor que se ha seleccionado como mínimo caudal de recirculación) a través de la línea de mínima recirculación al calderín de baja presión, creando así un circuito cerrado en el que el agua estaría recirculando a la espera de que se demande un caudal hacia el calderín de media presión. A medida que la demanda de agua fuera creciendo, la válvula de control de recirculación iría cerrando su sección efectiva y permitiendo el paso de agua hacia el calderín de media presión. Justo en el momento que la demanda iguale el valor de 13 kg/s, la válvula de mínima recirculación debe estar totalmente cerrada, y la totalidad del caudal que aporta la bomba circulando hacia el calderín de media presión.

En las tuberías de descarga de las bombas, hay una válvula que evita que el agua fluya en sentido contrario, provocando el giro inverso en las bombas. Estas válvulas sólo deben estar abiertas, cuando se demande agua en el calderín de media presión y la bomba de dicha línea esté activa.

Las tuberías de descarga de las bombas se unen en una tubería común de 4” encontrándose aguas abajo el calderín de media presión. En esta tubería hay una válvula de control que garantiza que el caudal que aporta la bomba al calderín de media presión se ajuste al demandado.

3.4 Sistemas de soporte

- Sistemas de media tensión para el funcionamiento de las bombas principales.
- Sistema de baja tensión, encargado de proporcionar electricidad a las válvulas motorizadas.
- Subsistema de aire comprimido para el accionamiento de las válvulas neumáticas.
- Sistema de condensado: Es el encargado de suministrar agua procedente del condensador para el llenado de la caldera de baja presión.
- Sistemas de refrigeración auxiliar. Se suministraría agua procedente del sistema de refrigeración auxiliar que refrigeraría los cojinetes y los sellos de las bombas de media y alta presión.
- Sistema de muestreo y análisis. Se realiza un muestreo en cada una de las líneas de aspiración de las bombas.

3.5 Emergencias y permisivos

Debido al alcance del proyecto, que se centra en el subsistema de presión intermedia, se tienen en cuenta las siguientes emergencias y las consecuencias que implicarían. Además, se exponen las condiciones físicas que debe cumplir el sistema para tener permiso de arranque (comúnmente conocidas como permisivos de arranque).

- Alta presión en el calderín de Baja Presión: Si se detecta una presión elevada en el calderín de Baja Presión, se procede a disparar la bomba que esté en funcionamiento y después de rechazar a manual el control del sistema, se pararán todos los actuadores y bombas hasta que un operador humano rearmara el sistema.
- Bajo nivel en el calderín de Baja Presión: Al detectar un bajo nivel en el calderín, debe procederse inmediatamente a la parada del sistema. Además, su señal negada, o sea que no haya bajo nivel en el calderín de baja presión es un permisivo de arranque del sistema y de ambas bombas.
- Mínimo caudal de recirculación: Si se detecta un bajo caudal en la descarga de las bombas, inferior al valor especificado, la bomba en funcionamiento se disparará, arrancando automáticamente la línea de reposo y reponiendo el caudal demandado por el calderín de media presión.

3.6 Sistema implementado en EcosimPro

Para implementar el sistema de agua de alimentación de presión intermedia se ha utilizado la librería Fluidapro, Mechanical y Ports_Lib.

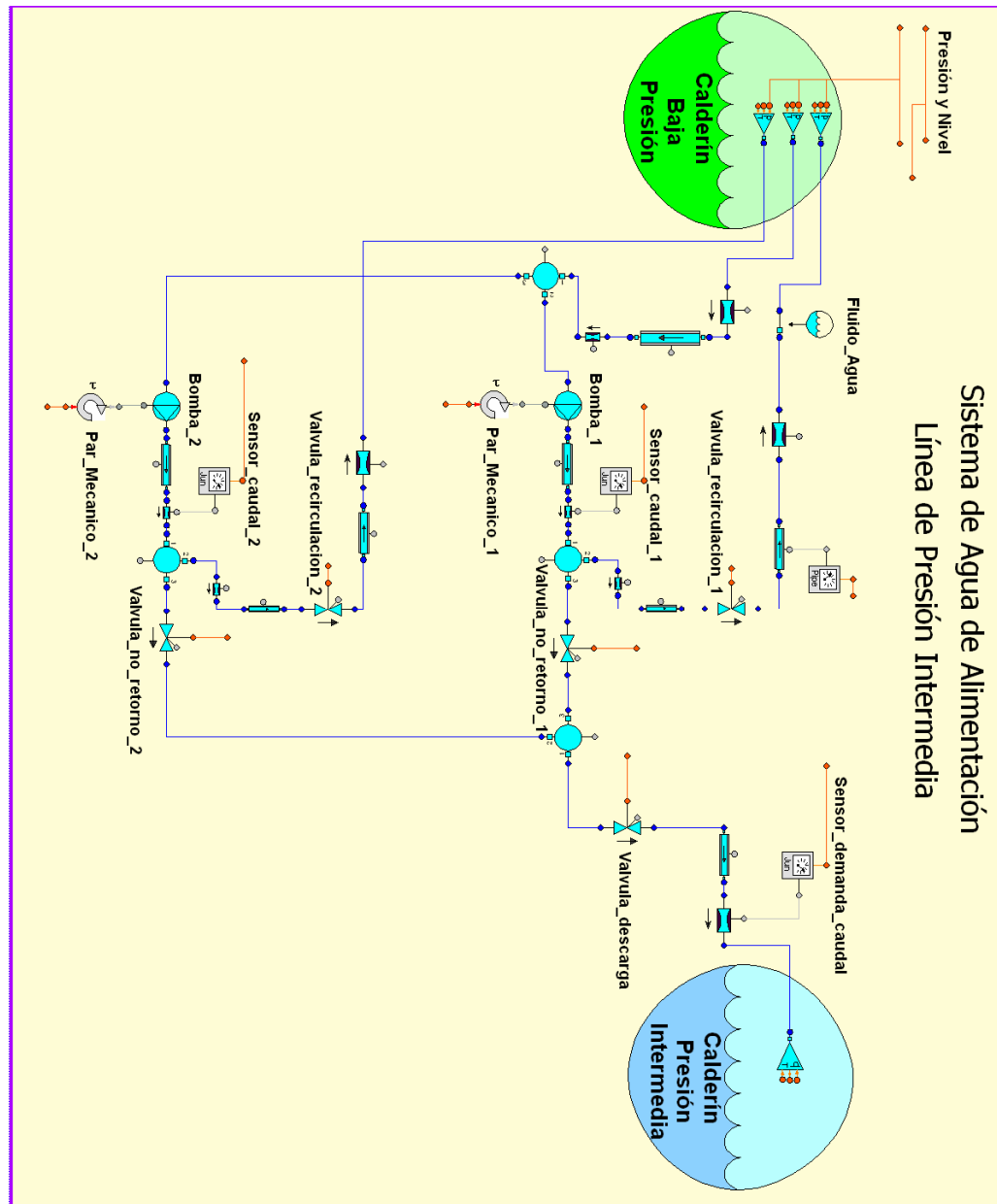


Figura 11. Sistema de agua de alimentación en EcosimPro

Como se muestra en la figura 11, hay que definir un fluido, que en este caso es agua, pues en el sistema de agua de alimentación el fluido permanece en todo momento en fase líquida. Se representa en el esquemático por el símbolo que lleva el nombre de *Fluido_Agua*.

Las condiciones de contorno que representan mediante presión y temperatura al calderín de baja presión están agrupadas en el símbolo que lleva el mismo nombre.

Desde ahí parte una línea común que suministrará agua a baja presión para la aspiración de ambas bombas. Las otras dos condiciones de contorno en el símbolo del calderín de baja presión, corresponden a las correspondientes líneas de mínima circulación de cada una de las bombas. Estas líneas están dotadas de válvulas de control (en la figura 11 aparecen bajo el nombre de *Válvula_Recirculación*) que regulan el caudal que circula a través de esta línea.

Las bombas aparecen en el esquemático bajo el nombre de *Bomba_1* y *Bomba_2*. Unidas al puerto mecánico (puerto gris) de las bombas se encuentra el símbolo del par mecánico, cuya función es transmitir un par al motor de las bombas.

A la salida de las bombas, apreciamos las válvulas que tienen como función que el fluido no circule en dirección contraria al que debiera (*Válvula_no_retorno*), y se descargue totalmente en el calderín de media presión.

Las líneas de impulsión de las bombas, se unen en una línea de descarga común, cuyo caudal es controlado por la válvula de control denominada en el esquemático *Válvula_descarga*.

Por último encontramos la condición de contorno que define al calderín de media presión, mediante temperaturas y presión conocidas.

Capítulo 4

Típicos de control

Diseño de las macros

4.1 Macros de control

Las macros de control son estructuras lógicas previamente programadas que forman entidades que controlan accionamientos y dispositivos eléctricos (bombas, válvulas, etc.) de campo con características claramente definidas o ayudan a estructurar jerárquicamente el sistema de control programado en el sistema de control distribuido (SCD). Las macros de control gestionan la información digital y analógica que el propio accionamiento o dispositivo envía al SCD y genera las señales adecuadas según cada situación. Así pues, por un lado, la macro tiene una serie de entradas, que pueden provenir del propio SCD (órdenes de arranque, parada, disparos, etc.) o feedbacks (señales de estado) del dispositivo que controla (válvula abierta/cerrada, motor en arranque/parada). Al mismo tiempo, la macro genera señales que pueden ser órdenes directas al dispositivo (orden de cierre/apertura de una válvula, orden de arranque/parada

para una bomba) y señales de información de estado del dispositivo y monitorización que servirán al SCD para gestionar y controlar el sistema.

Los típicos de control, o macros de control, son la parte fundamental de un sistema de control automático en una central de ciclo combinado. Garantizan el funcionamiento y la gestión de todos los actuadores de forma efectiva y fiable, sin introducir retrasos y errores característicos de operarios humanos. Esto permite además programar secuencias de arranque complejas y paradas automáticas.

Además de estas ventajas, detectan anomalías en el funcionamiento de los actuadores mediante comparaciones con el estado real del mismo, y éstas son notificadas al operario para que solucione la situación de emergencia. Una vez éste ha resuelto la situación, tras rearmar el sistema, los típicos de control serían capaces de volver a controlar de forma automática la central.

Algunas de estas macros, están especialmente diseñadas para gestionar equipos redundantes, que deben existir para evitar la parada y las pérdidas económicas que eso conllevaría en una central térmica.

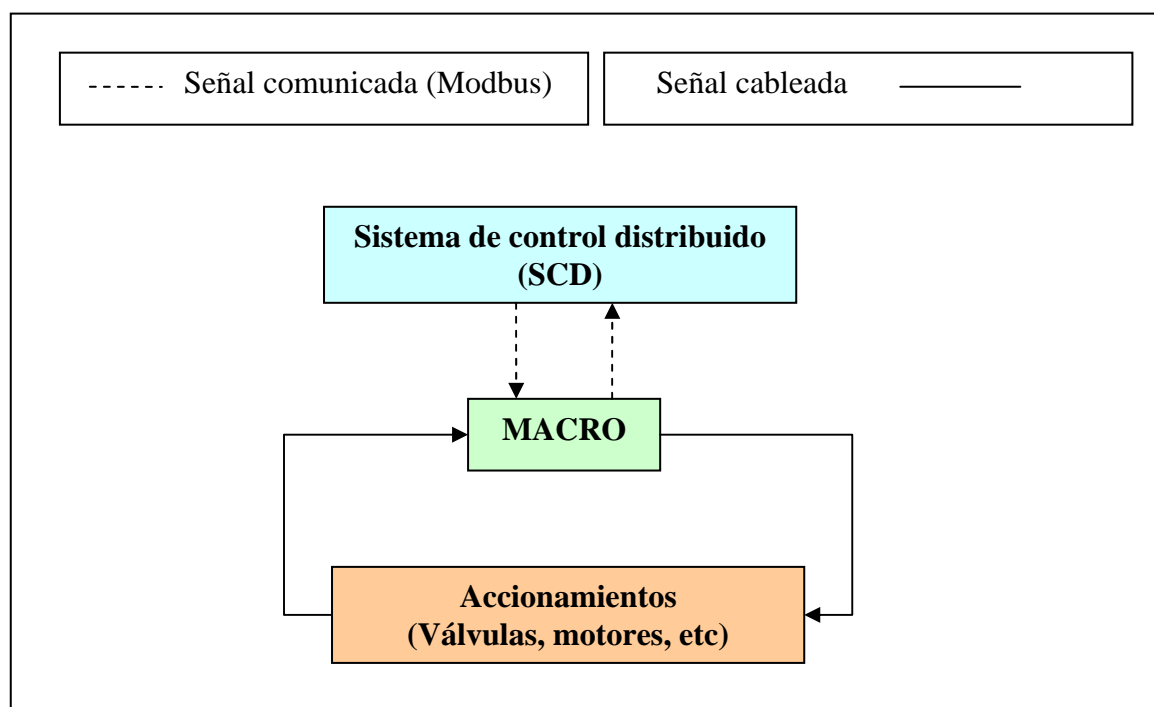


Figura 12. Comunicaciones entre SCD, macros y accionamientos

En el esquema de la Figura 12, se muestra el rol que juega la macro y que anteriormente ha sido explicado. La macro recibe señales comunicadas por Modbus desde el sistema de control distribuido, como puede ser por ejemplo una orden de arranque de algún sistema en concreto. Al mismo tiempo envía información al SCD, para que éste sea consciente en todo momento del estado de los sistemas. Sin embargo, con esta información no sería suficiente para controlar un sistema real. Por ello, también se necesitan señales cableadas del dispositivo que informen a la macro del estado del mismo. Por último, la macro también envían las órdenes al accionamiento a través de cable. Para que este razonamiento quede más claro, a continuación se expondrá la secuencia de órdenes que seguirá el sistema, al arrancar una bomba desde el SCD. En primer lugar, se debe generar en el SCD la orden de arranque, y para ello se requerirán unas condiciones en el sistema, que el SCD evaluará si se cumplen, y posteriormente vía Modbus se enviará dicha señal a la macro. La macro internamente, utilizando los feedbacks del motor, y la información que requiera del SCD, tales como permisos de arranque, generará el comando de arranque, que a través de cable se enviará al motor, procediendo éste a su activación.

El objetivo del diseño de las macros es garantizar la fiabilidad en el control, y obtener siempre la misma respuesta ante las mismas entradas jerarquizando el control de los accionamientos. Gracias a las macros, cualquier programador que trabaje en el proyecto, conocerá y podrá prever como reaccionará cada uno de los accionamientos ante todo tipo de estímulos de entrada, evitando así estados imprevistos en el sistema, que pudieran provocar al SCD que generara órdenes erróneas.

Todas las macros tienen una serie de características comunes que se exponen a continuación:

Las macros de control poseen dos modos de funcionamiento: automático y manual. En el modo automático, es el sistema de control distribuido el que puede actuar directamente sobre el accionamiento, según la lógica que se haya programado previamente en el mismo.

En el modo manual, es el operario el que tiene el control sobre el accionamiento. Por lo tanto, el accionamiento ignorará toda orden que provenga del SCD y sólo

obedecerá los comandos introducidos por el operario. Este modo de operación es también conocido como HMI (*Human-machine interface*).

Para que una macro pueda operar en un modo u otro, posee una señal digital que actúa de permisivo para habilitar o deshabilitar el estado manual y automático. Los permisivos de entrada a las macros no se limitan sólo a permitirles actuar en modo manual o automático, también condicionan que se puedan generar los comandos de salida de la macro, como por ejemplo enviar una señal de arranque a la bomba, sin que la macro de la bomba tenga permisivo de arranque. Estos permisivos deben programarse en el sistema de control distribuido adecuadamente, para evitar situaciones de emergencia que pudieran dañar al accionamiento. Así por ejemplo, si una caldera se encuentra con un nivel muy bajo de agua, esta señal, enviada hacia el SCD a través de un transmisor de nivel, debe estar conectada previa negación al permisivo de arranque de las bombas que vayan a aspirar de esa caldera, en la macro de control de dicha bomba.

Siguiendo el mismo razonamiento, si un accionamiento se encuentra operativo, y alguna condición de proceso presenta un peligro para el mismo, éste debe dispararse, parando su funcionamiento y cambiando su modo de operación a manual, para que sólo un operario, tras previamente haber arreglado el fallo y haberlo rearmado (*acknowledge*) pueda volverlo a arrancarlo. Este disparo, debe también enviar una señal al SCD que indique que ese accionamiento no está operativo, para que pueda arrancarse un sistema redundante si lo hubiera o dar una alarma que avisé a los operadores de la anomalía.

A continuación se procede a explicar en detalle el funcionamiento interno de las macros, y cada una de las señales de entrada y salida que la componen. Al tener en común muchas señales, sólo se procederá a explicar una vez la misma, indicando la macro en concreto que sirve de referencia para la descripción de la señal que se repita. Es por ello que se explicarán con más énfasis las primeras macros, al seguir los siguientes comportamientos análogos a las mismas.

Cabe destacar, el uso de términos en inglés para la designación de algunas señales. El motivo de esta mezcla de señales con nombres en inglés, y en castellano, es debido a que en la empresa, debido a su trabajo en centrales internacionales y nacionales al mismo tiempo, se acostumbra a hacer referencia a las señales en su versión

anglosajona. Hemos querido respetar esta nomenclatura en el proyecto fin de carrera, pues uno de los motivos del mismo es que sirva como referente para futuros proyectos en el mismo departamento.

4.2 Macro del motor de media tensión (MMT)

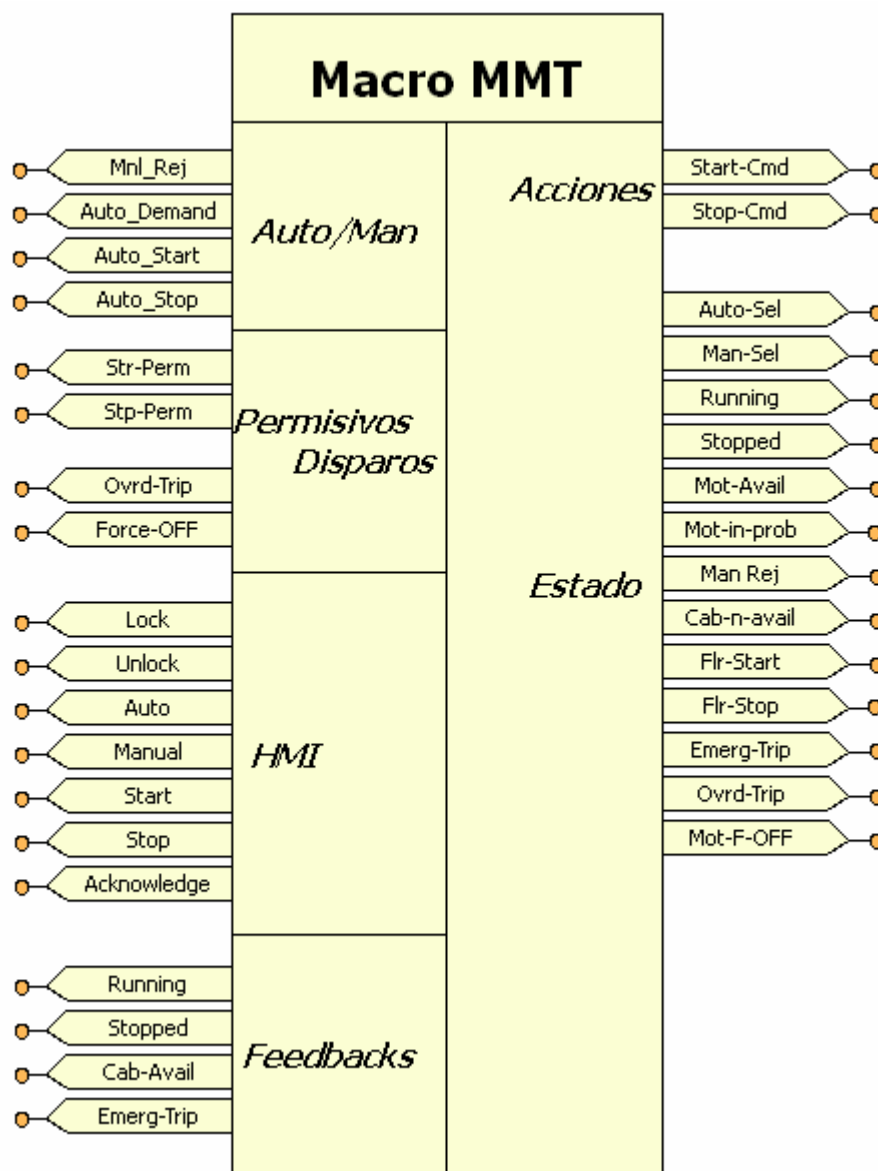


Figura 13. Símbolo de la macro MMT

4.2.1 Campo de Aplicación

La macro MMT se usa para implementar el control de un motor de media tensión que será accionado por un mecanismo eléctrico diseñado para recibir por separado órdenes de parada y arranque. Es aplicable para todos los motores eléctricos de media tensión asíncronos de bombas y ventiladores con arranque directo, con o sin protección

diferencial. Cuando hay simultaneidad de órdenes (arranque y parada), tendrá prioridad el comando de parada.

Debido a la importancia, y la complejidad de los equipos que usan un motor de alta tensión, esta macro tiene un papel muy relevante y por ello su macro será explicada con mayor detalle que el resto.

4.2.2 Funcionalidad de control

El operador, desde el centro de control, tendrá la posibilidad de enviar manualmente comandos de arranque, parada, bloqueo, rearme de anomalías o disparos, desbloqueo o activar el modo de funcionamiento automático a través de los siguientes botones:

- AUTO
- MANUAL
- ARRANQUE
- PARADA
- BLOQUEO
- DESBLOQUEO
- REARME

Las funciones que puede ejercer el operador se muestran en la siguiente figura:

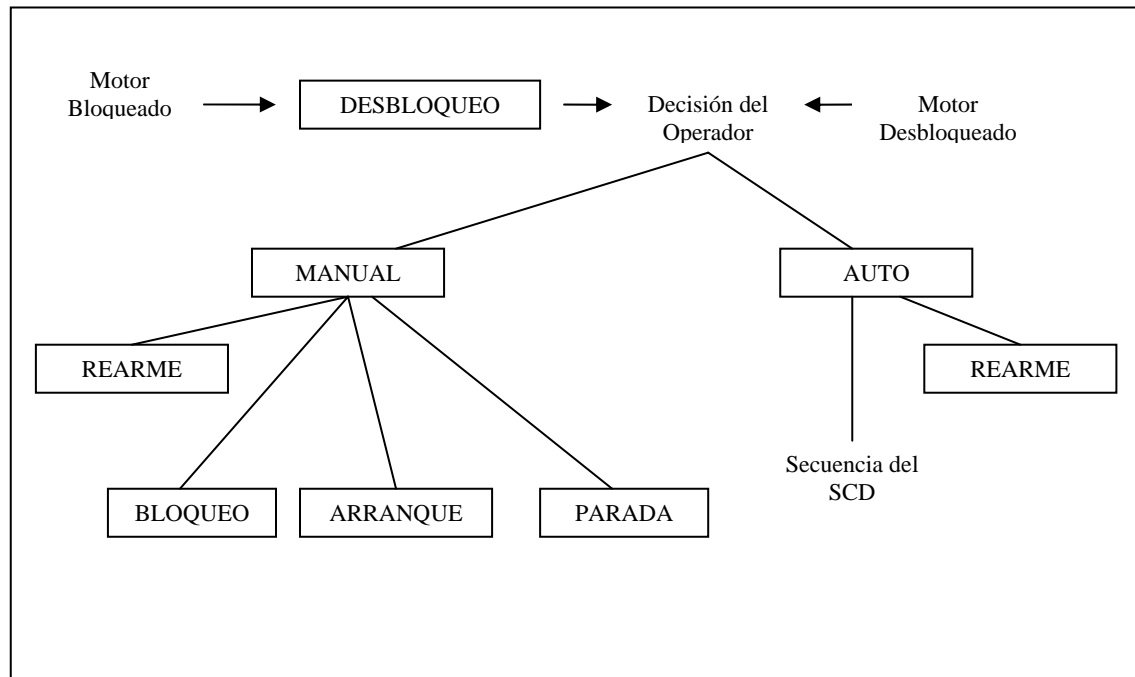


Figura 14. Opciones de control de la macro MMT

Las órdenes automáticas o manuales están condicionadas por el estado del motor y del sistema que se esté implementando.

Los siguientes estados generales del equipo pueden también ser supervisados desde el centro de control:

- Disparo o Anomalía
- Arranque / Parada
- Permisivo de arranque/parada
- Modo de operación (Manual o Auto)
- Bloqueado / Desbloqueado
- Disponibilidad del cubículo eléctrico

4.2.3 Esquemático en Ecosimpro

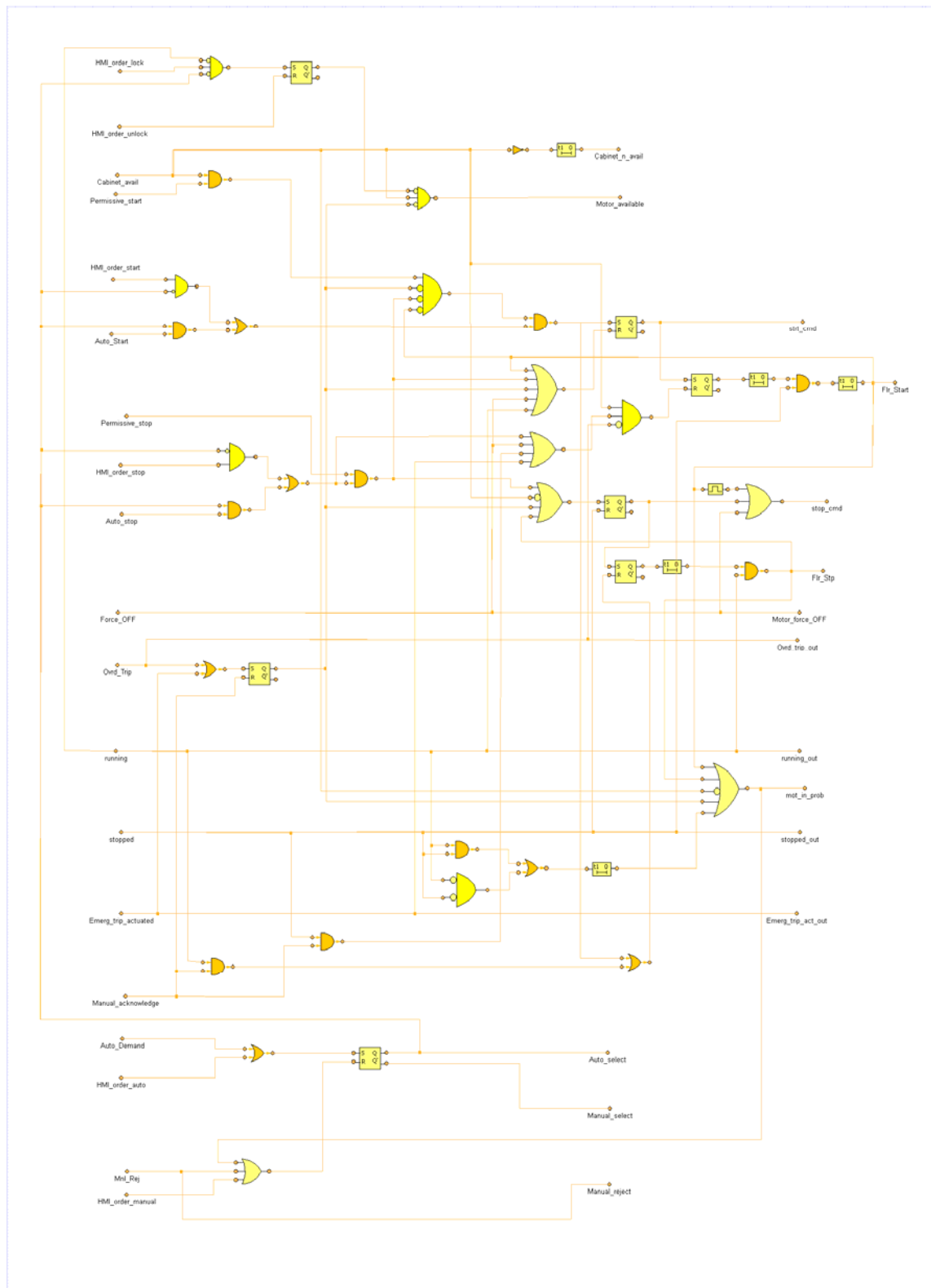


Figura 15. Esquemático de la macro MMT

4.2.4 Señales de la macro MMT

En este apartado, se explicarán todas las señales que componen la macro MMT, tanto de entrada como de salida, al igual que señales generadas automáticamente por el SCD como señales provenientes del operador o feedbacks del propio motor, que de forma cableada informan del estado del mismo. Sin embargo, muchas de estas señales, también son compartidas por otras macros, y por lo tanto servirán de referencia para el entendimiento de las mismas.

El siguiente bloque lo componen las señales de entrada de la macro MMT:

Manual(HMI): Cambia el dispositivo al modo de operación manual y permite el control manual del motor desde el centro de control. Las órdenes de arranque (A-Str) y parada (A-Stp) que provengan del modo AUTO no se tendrán en cuenta.

Auto(HMI): Activa el modo de operación automático, permitiendo el control exclusivo del motor a través de la secuencia implementada en el SCD. Todas las órdenes provenientes del modo de operación manual (arranque, parada, bloqueo, desbloqueo) serán ignoradas.

Arranque(HMI) (Start): Si se dispone de permisivo de arranque, y el motor está en modo manual, arranca el mismo.

Parada(HMI) (Stop): Si se dispone de permisivo de parada, y el motor está en modo manual, procede a la parada del motor.

Bloqueo(HMI) (Lock): Se activa al pulsar el botón BLOQUEO desde el centro de control. El dispositivo pasará al modo bloqueado sólo si al pulsar el botón BLOQUEO, el motor está en el modo de operación MANUAL y no está en funcionamiento, o sea arrancado. Mientras esta señal esté en el estado lógico 1 y el motor en el estado BLOQUEADO, serán ignoradas tanto las señales que provengan del modo manual como del modo automático.

Desbloqueo(HMI) (Unlock): Se activa al pulsar el botón DESBLOQUEO desde el centro de control. Si el motor está en el estado BLOQUEADO, este pulso cambiará el

estado a DESBLOQUEADO, permitiendo que sean tenidas en cuentas las señales manuales o automáticas.

Rearme(HMI) (Acknowledge): Cuando esta señal está en el estado lógico 1, todas las anomalías y disparos son reseteados y las correspondientes alarmas en pantalla desaparecerán.

Demanda de auto (Auto_Demand): El SCD cambia el motor de estado manual a estado automático siempre y cuando la señal de rechazo a manual no esté activada.

Rechazo manual (M-Reject): Al pasar del estado lógico 0 a 1, cambia el modo de operación a manual. Una vez seleccionado el modo de operación manual, es imposible cambiar al modo automático mientras esta señal esté a 1.

Auto arranque (Auto-Start): Arranca el motor en el modo de operación automático si la señal de permisivo de arranque (Str-Perm) está en el estado lógico 1 y el motor está parado. Esta entrada es usada en la secuencia del SCD para arrancar el motor automáticamente.

Auto parada (Auto-Stop): Realiza la parada del motor en el modo de operación automático si la señal de permisivo de parada (Stp-Perm) está en el estado lógico 1 y el motor está arrancado. Esta entrada es usada en la secuencia del SCD para parar automáticamente el motor.

Permisivo de arranque (Str-Perm): Es una señal interna del SCD o de una condición de proceso. Autoriza el arranque del motor si su estado lógico es 1, tanto en modo de operación manual como automático.

Permisivo de parada (Stp-Perm): Autoriza la parada del motor si su estado lógico es 1, tanto en modo de operación manual como automático.

Disparo (Ovrd-Trip): Esta señal para inmediatamente el motor, tanto en modo de operación manual como automático, incluso sin tener permisivo de parada y activa una

señal de emergencia para que el operador solucione la situación que ha provocado este disparo.

Forzado-Parada (Force-OFF): Al activarse esta señal, se procede a la parada inmediata del motor, incluso sin disponer de permisivo de parada.

Electricidad no disponible: Esta anomalía indica que el motor no tiene energía eléctrica disponible para operar. Esta anomalía rechaza el MMT a control manual.

Cabina disponible (Cab avail): Es una entrada conectada al interruptor de control de la disponibilidad del suministro de tensión. Si su estado lógico es 0, es imposible enviar una señal de arranque al interruptor y la alarma correspondiente será mostrada en el centro de control.

Arrancado (running): Es una entrada hardware que se encuentra físicamente en el motor, que de forma cableada envía información al SCD, e indica que el motor está arrancado, o sea en funcionamiento.

Parado (stopped): Es una entrada hardware que se encuentra físicamente en el motor, que de forma cableada envía información al SCD, e indica que el motor está parado.

Disparo de Emergencia (Emerg-Trip): Es un feedback cableado desde el motor, que indica que por alguna anomalía el motor se ha disparado, y avisa a la macro de este estado de emergencia, procediendo a la parada del motor.

A continuación se explican las señales de salida de la macro MMT. Se incluyen comandos como el de arranque y parada, además de las alarmas, e indicaciones del estado en el que se encuentra la macro.

Comando de arranque (Str-Cmd): Esta señal irá directamente cableada al interruptor del motor que permite su arranque. Por lo tanto, al generarse esta señal en la macro, el motor se arrancará.

Comando de parada (Stop-Cmd): Con razonamientos análogos al comando de arranque, esta señal está cableada con el interruptor del motor que permite su parada. Al activarse, el motor se parará inmediatamente.

Auto seleccionado (A-Sel) : Es una señal interna del SCD que indica que el motor está en modo de operación AUTO. Las órdenes de entrada de arranque y parada provienen de la secuencia interna del SCD.

Demanda auto (Auto Req): Es una alarma que indica que existe una anomalía por demanda de modo de operación automático.

Fallo de arranque (Flr-strt): Es una alarma que indica anomalía al haber intentado arrancar el motor y no haberse podido.

Fallo de parada (Fl-Stp): Esta alarma indica un fallo al haber intentado parar el motor.

Disparado (Tripped): Alarma que indica la existencia de una anomalía por disparo en el motor.

Rechazo manual (Man-rej): Es una alarma que indica la existencia de anomalía por rechazo manual.

Fallo de arranque (Run-flr): Alarma que indica la existencia de una anomalía por fallo de arranque.

Pulsador de disparo (Trip-Pushb) Es una alarma que indica la existencia de una anomalía del tipo pulsador de disparo.

El resto de señales de salida de la macro, tienen un papel informativo del estado de la misma.

4.3 Macro de la válvula motorizada

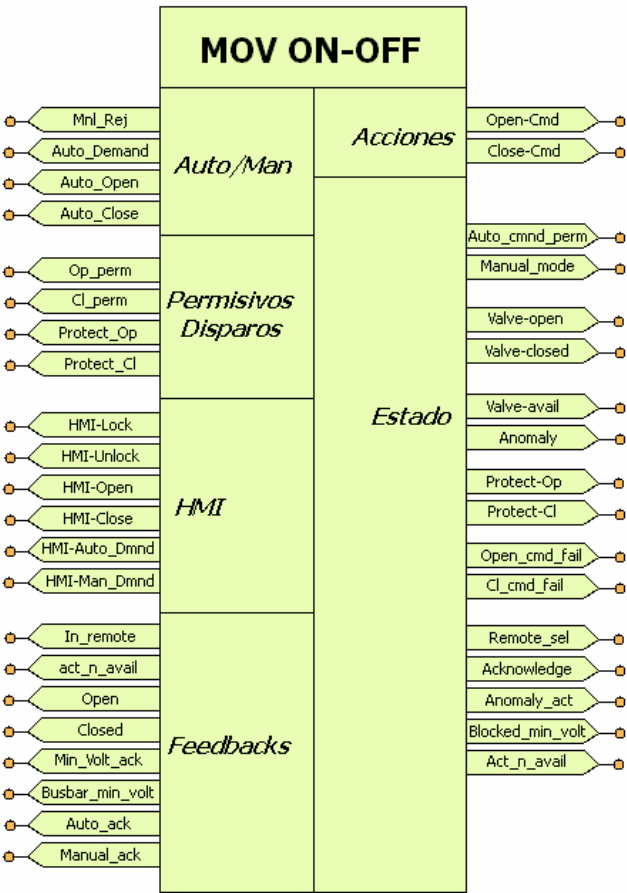


Figura 16. Símbolo de la macro de la válvula motorizada

Esta macro se utiliza para controlar una válvula motorizada que tiene dos posibles estados: abierta y cerrada, sin posición intermedia. El actuador de la válvula es un motor eléctrico, de ahí proviene su nombre. Se utiliza en aquellos casos en los que no haga falta una regulación del paso de caudal a través de la misma.

4.3.1 Esquemático de la macro de la válvula motorizada

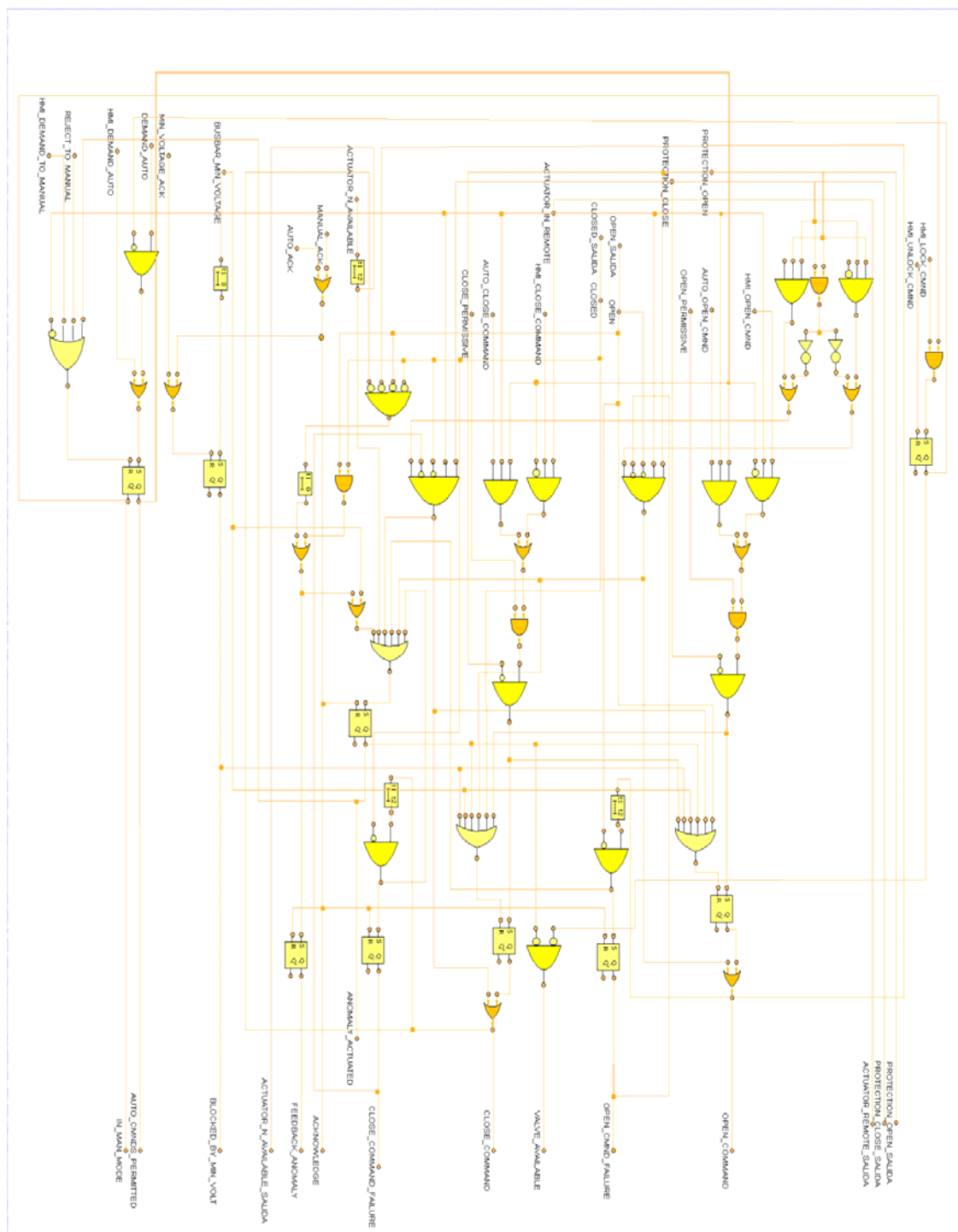


Figura 17. Esquemático de la macro de la válvula motorizada

4.3.2 Señales de la macro de la válvula motorizada

En este apartado se explicarán exclusivamente aquellas señales que no se hayan mencionado anteriormente.

Permisivo de apertura (open_permissive): Permiso de apertura, es una señal mantenida como resultado de la lógica interna del SCD o por condiciones del proceso. Autoriza a la válvula a abrirse si esta señal está a 1 en cualquier modo de operación (automático o manual).

Permisivo de cierre (close_permissive): Permiso de cierre, es una señal mantenida como resultado de la lógica interna del SCD o por condiciones del proceso. Autoriza a la válvula a cerrarse si esta señal está a 1 en cualquier modo de operación (automático o manual).

Comando de apertura automático (Auto_Open_CMND): Es una señal en forma de pulso de un control superior o como consecuencia de una condición del proceso. Abrirá la válvula si, estando en modo AUTO, el permisivo de apertura está a 1. Esta entrada la utiliza el SCD para abrir automáticamente la válvula.

Comando de cierre automático (Auto_Close_Cmnd): Es una señal en forma de pulso de un control superior o como consecuencia de una condición del proceso. Cerrará la válvula si, estando en modo AUTO, el permisivo de cierre está a 1. Esta entrada la utiliza el SCD para cerrar automáticamente la válvula.

Apertura de protección (Protection_Open): Señal interna del SCD que abre la válvula en modo AUTO de operación y la mantiene abierta hasta que se pone Protection_Open a 0 y se activa un comando de cierre. En caso de darse las dos señales, apertura de protección y cierre de protección al mismo tiempo, si la válvula es de tipo fallo abre, se abrirá, y si es de tipo fallo cierra, se cerrará.

Cierre de protección (Protection_Close): Señal interna del SCD que cierra la válvula en modo AUTO de operación y la mantiene cerrada hasta que se pone Protection_Close a 0 y se activa un comando de apertura. En caso de darse las dos

señales, apertura de protección y cierre de protección al mismo tiempo, si la válvula es de tipo fallo abre, se abrirá, y si es de tipo fallo cierra, se cerrará.

Rechazo a manual (Reject_to_manual): Esta anomalía indica que, estando en modo de operación AUTO, se cambia a modo MANUAL por una imposición del SCD.

Demanda a manual (HMI_demand_to_manual): Señal que indica que el operario ha pulsado el botón de solicitud de cambio de estado de automático a manual.

Demanda a automático (Demand_auto): Señal que indica que el SCD, como consecuencia de su lógica interna, solicita que se pase de modo manual a automático.

Demanda manual a automático (HMI_demand_auto): Señal que indica que el operario ha solicitado mediante la pulsación de un botón el paso de modo manual a automático.

Abierta (open): Válvula abierta. Es una señal del interruptor que marca el límite de apertura de la válvula motorizada. Cuando está a 1, la válvula está abierta.

Cerrada (closed): Válvula cerrada. Es una señal del interruptor que marca el límite de cierre de la válvula motorizada. Cuando está a 1, la válvula está cerrada.

Actuador no disponible (actuator not available): Esta anomalía indica que hay un fallo mecánico en el actuador, el selector local no está en modo de operación remota o, mientras la válvula está en posición abierta/cerrada, hay un fallo eléctrico interno de la válvula motorizada, por lo que el actuador no estará disponible.

Apertura manual (HMI_open_cmnd): Señal que indica que el operario ha pulsado el botón de apertura manual.

Cierre manual (HMI_close_cmnd): Señal que indica que el operario ha pulsado el botón de cierre manual.

Voltaje en barra bajo (busbar_min_voltage): Señal que indica una caída de tensión que provoca una anomalía.

Rearme de voltaje bajo (min_voltage_ack): Señal que resetea la alarma de la anomalía creada por la caída de tensión.

Actuador en remoto (actuator_in_remote): Señal que indica que el actuador está disponible para su manipulación remota. Valdrá 0 cuando se realicen operaciones locales con el mismo, como por ejemplo de mantenimiento. Si esta señal vale 0, la válvula ni se abrirá ni cerrará para evitar problemas de seguridad.

Las siguientes señales componen el bloque de salida de la macro de la válvula motorizada.

Comando de apertura (Open_Command): Es un pulso que se envía al actuador de la válvula para que abra la misma. Si después de “Ta” (tiempo de apertura) la válvula no se abre, la anomalía “tiempo de apertura normal excedido” se pondrá a valor 1.

Comando de cierre (Close_Command): Es un pulso que se envía al actuador de la válvula para que cierre la misma. Si después de “Tc” (tiempo de cierre) la válvula no se cierra, la anomalía “tiempo de cierre normal excedido” se pondrá a valor 1.

Comandos automáticos permitidos (auto_cmnds_permitted): Es una señal mantenida interna del SCD que indica que la válvula está en modo automático. Sólo se abrirá/cerrará la válvula con comandos provenientes del SCD.

Abierta (Open_salida): Señal que está a 1 si la válvula está abierta.

Cerrada (Closed_salida): Señal que está a 1 si la válvula está cerrada.

Rearme (Acknowledge): Indica que hay un rearme, bien sea manual o automático.

Apertura de protección (Protect_Op): Indica que se ha procedido a una apertura de protección.

Cierre de protección (Protect_Cl): Informa de que ha tenido lugar un cierre de protección.

Actuador remoto (Remote_sel): Esta indicación se activará cuando la válvula se encuentre en remoto.

Actuador no disponible (Act_n_avail): Esta anomalía indica que hay un fallo mecánico en el actuador, el selector local no está en modo de operación remota o, mientras la válvula está en posición abierta/cerrada, hay un fallo eléctrico interno de la válvula motorizada, por lo que el actuador no estará disponible. Esta anomalía provoca un rechazo del control a manual (reject to manual) .Además se activará una alarma por pantalla. Si tiene lugar esta anomalía y no se pulsa el botón de rearme, no se tendrá en cuenta ninguna orden automática o manual.

Válvula disponible (Valve_available): Esta señal valdrá 1 siempre y cuando no esté en estado bloqueado y no haya ningún problema que impida el correcto funcionamiento de la válvula.

Bloqueo por caída de tensión (blocked_by_min_volt): Indica que se ha bloqueado la válvula por una caída de tensión.

Anomalía actuada (anomaly_actuated): Indica que hay alguna anomalía, no se pondrá a 0 hasta que no se pulse el rearme y haya desaparecido el problema.

Anomalía de estado (Anomaly): Esta anomalía indica que se recibe la señal de que la válvula está abierta y cerrada al mismo tiempo (OPEN=1 CLOSED= 1).

4.4 Macro para la válvula solenoide fallo-cierre

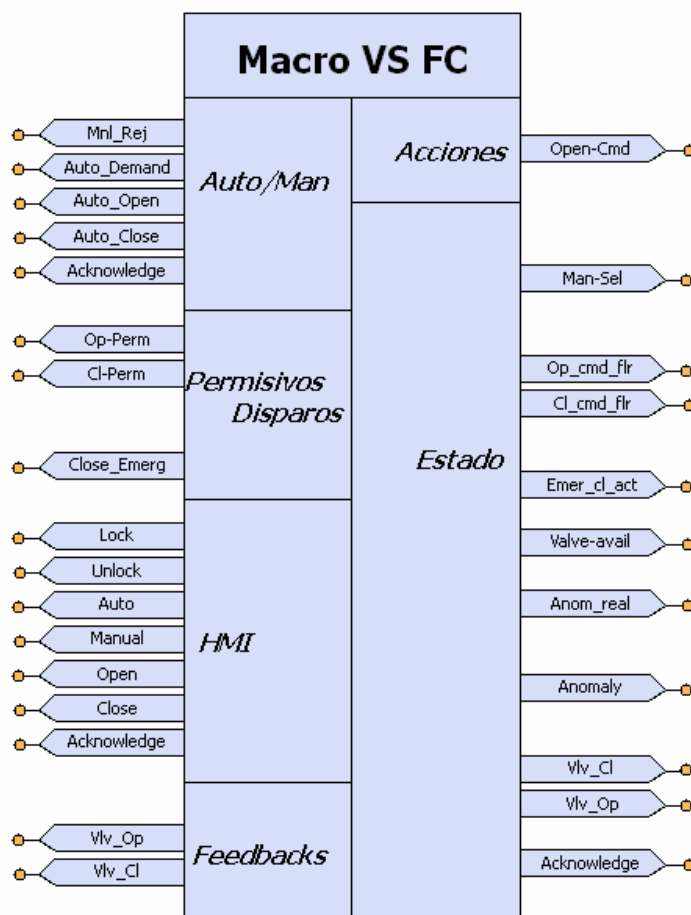


Figura 18. Símbolo de la macro de la válvula solenoide fallo-cierre

La diferencia respecto a la válvula motorizada, es que en este caso el actuador es un solenoide actuado neumáticamente, en el que si hay un fallo en el suministro de aire, la válvula automáticamente procederá a su cierre.

La válvula solenoide comparte prácticamente las mismas señales de entrada y salida que la motorizada, y por tanto no se procederá a explicarlas de nuevo, pues el razonamiento es el mismo. El motivo por el que necesita una macro aparte, es por la naturaleza mecánica de estas válvulas, y para asegurar que al fallar el suministro de aire ésta se cierre.

4.4.1 Esquemático de la macro de la válvula solenoide fallo-cierre

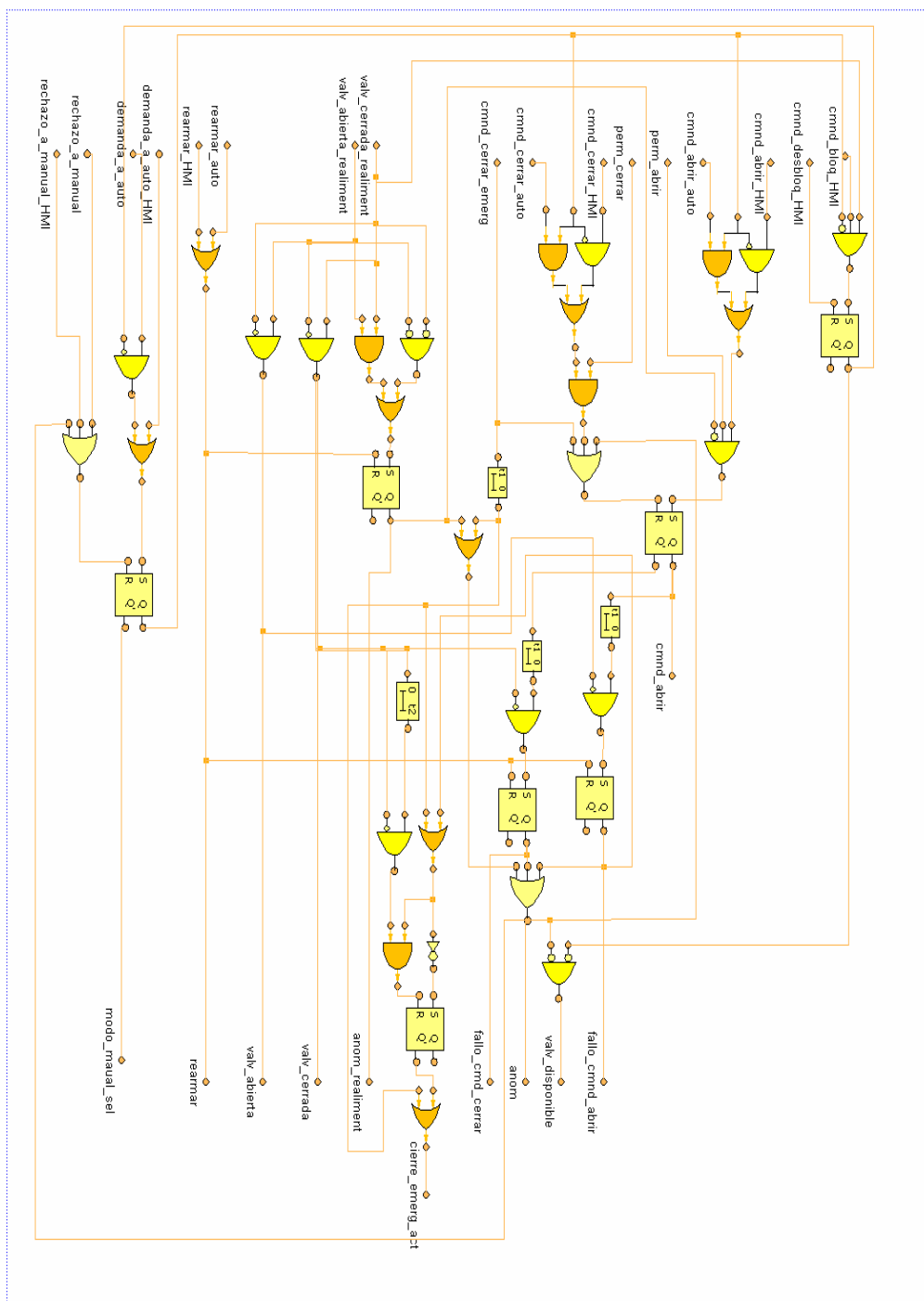


Figura 19. Esquemático de la macro de la válvula solenoide fallo-cierre

4.5 Macro para la válvula de control

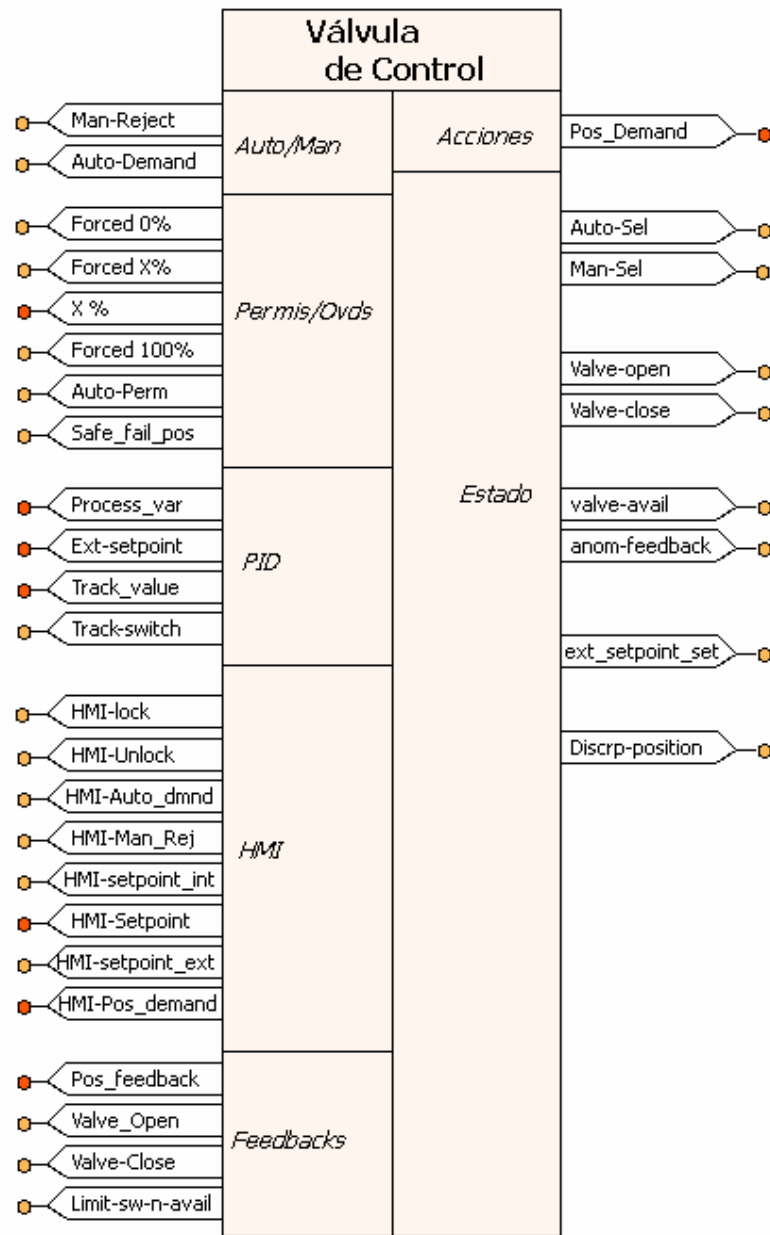


Figura 20. Símbolo de la macro de la válvula de control

La válvula de control se emplea para controlar una variable de proceso (caudal, temperatura, nivel, etc.), de forma que el valor de dicha variable acabe igualándose al valor del punto de consigna (setpoint). Esta macro incorpora un regulador PID (Proporcional integral derivativo) que calcula en todo instante la posición de la válvula de forma que el error entre la variable de proceso medida y el setpoint quede anulado, minimizando el efecto de las perturbaciones en el sistema. Éste regulador sólo actuará si

la válvula está en modo automático. Si por el contrario se fuerza a que la válvula se coloque en alguna posición en concreto, se ignorará la señal de posición enviada por el PID. La opción de tracking, permite imponer una posición de la válvula de control sin tener en cuenta el valor real de la variable de proceso.

4.5.1 Esquemático de la válvula de control

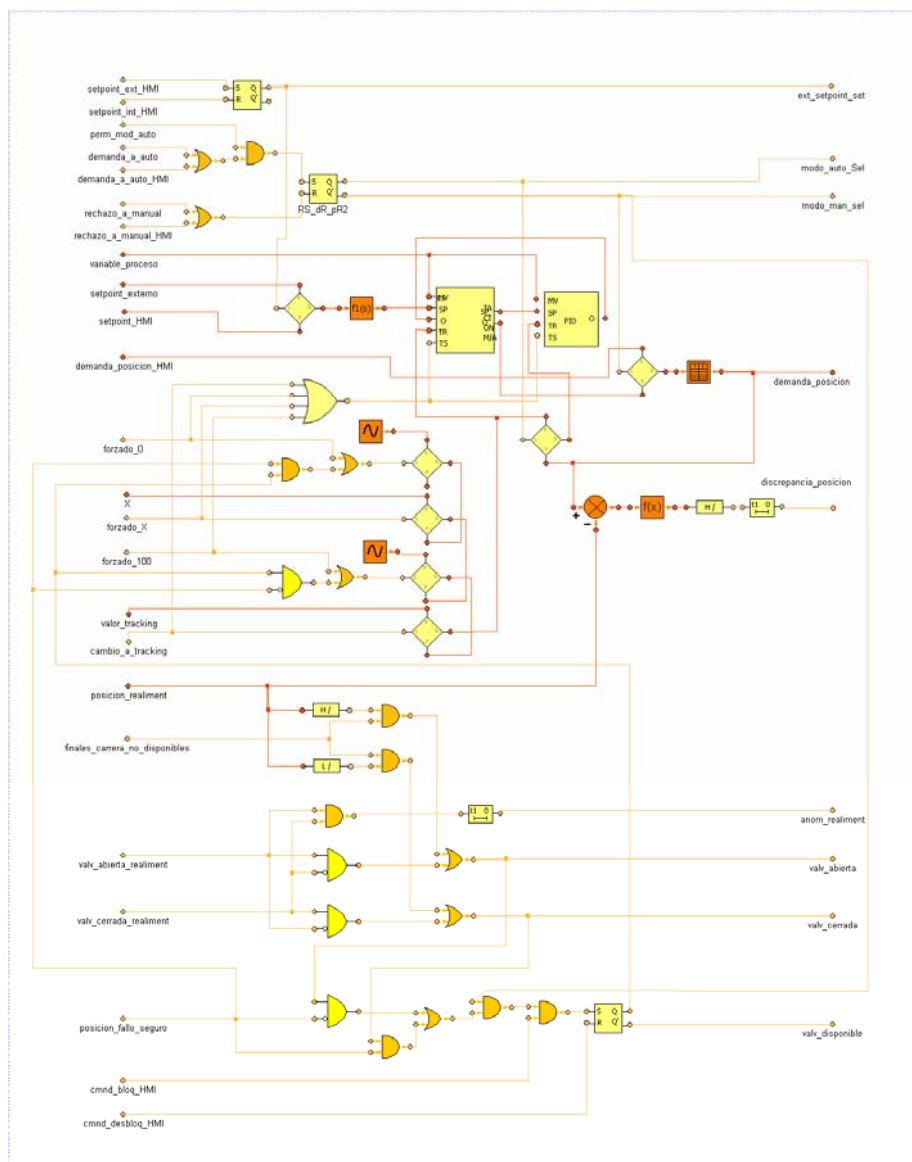


Figura 21. Esquemático de la macro de la válvula de control

4.5.2 Señales de la macro de la válvula de control

Como se ha realizado anteriormente con la válvula solenoide, sólo se expondrán aquellas señales exclusivas de la válvula de control, coincidiendo el resto, con las de la válvula motorizada, explicadas en el capítulo 4.3.

Forzado al 0% (Forced 0%): Esta señal fuerza el cierre completo de la válvula solenoide. Esto permite una actuación rápida de la válvula en caso de que fuese necesario.

Forzado al 100% (Forced 100%): Esta señal fuerza la apertura completa de la válvula solenoide.

Forzado al X% (Forced X%): Esta señal consiste en forzar a la válvula a posicionarse en un valor determinado externamente. Útil para realizar posicionamientos previos y conocidos por el operario.

X%: A través de este puerto analógico se introduce el valor al que se debe posicionar la válvula.

Variable de proceso (Process_var): Variable analógica, que proviene del sistema físico, y que se desea controlar. En nuestro sistema controlamos el caudal.

Interruptor de tracking (tracking switch): Si esta señal se activa, se configura la válvula de control en modo tracking.

Valor del tracking (tracking value): Valor al que debe posicionarse la válvula independientemente de la variable de proceso y del setpoint.

Punto de consigna (setpoint): Éste es el valor al que el PID debe igualar la variable de proceso mediante la actuación en la válvula.

Respecto al punto de consigna, se debe aclarar que puede estar internamente asignado por defecto o que se le puede atribuir un valor externamente, por parte del operador. Para ambos casos hay un respectivo puerto de entrada en la macro.

Posición feedback: Esta señal cableada proviene de la válvula e indica la posición real de la misma.

Limit-sw-n-avail (finales de carrera no disponible): Como su nombre indica, esta señal cableada que proviene de la válvula, avisa de alguna anomalía que inhibe el correcto funcionamiento de los actuadores de final de carrera de las posiciones extremas de la válvula.

A continuación se exponen las señales de salida de la macro de la válvula de control, que no se hayan explicado anteriormente.

Setpoint externo: Esta señal avisa, de que la consigna se está asignando externamente por parte del operador.

Discrepancia de posición (Discrp-position): Se produce una anomalía cuando la desviación entre la posición real de la válvula y la demandada por la macro sea superior a un 10%.

4.6 Macro para el grupo funcional

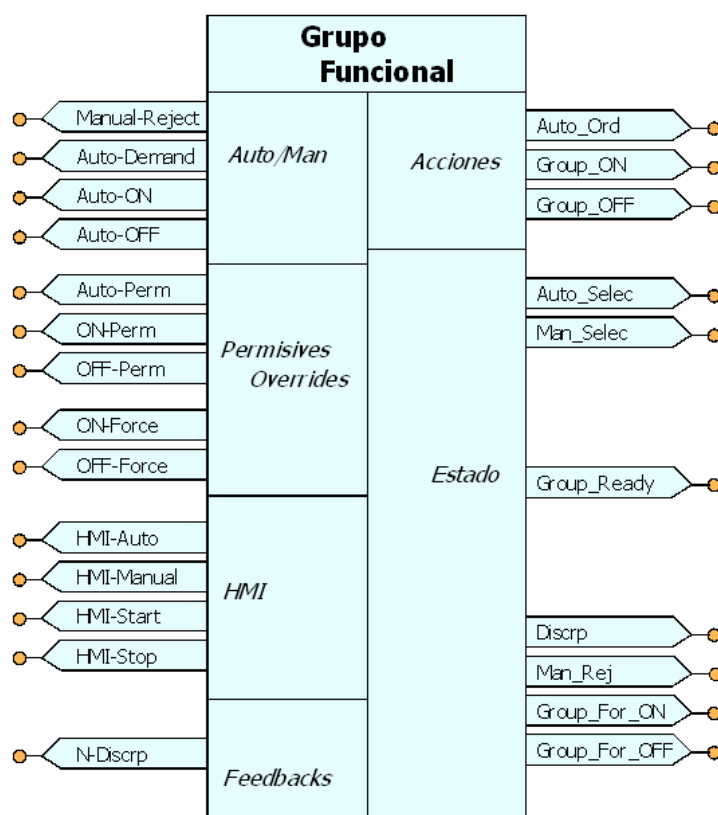


Figura 22. Símbolo de la macro del grupo funcional

Esta macro no actúa directamente con ningún accionamiento, sino que engloba y controla una serie de ellos. En los sistemas en los que haya redundancia de equipos, y uno permanezca en reserva, y otro en funcionamiento, se deberá distinguir entre ambos a la hora de asignarles órdenes desde el SCD. Por lo tanto la macro del grupo funcional tiene como objetivo jerarquizar el control en modo automático, de forma que entidades superiores (SCD, PLCs, etc.) puedan controlar a entidades inferiores (subgrupos formados por válvulas, bombas, etc.).

Los subgrupos sólo recibirán las órdenes de un grupo superior en la jerarquía de control si estos están configurados para operar en modo automático, si no es así, ignorarán toda orden procedente del SCD y sólo operarán en modo manual por parte del operario. Este tipo de control jerarquizado, también permite que se puedan crear secuencias de arranque para distintos accionamientos en el orden que se desee.

4.6.1 Esquemático de la macro del grupo funcional

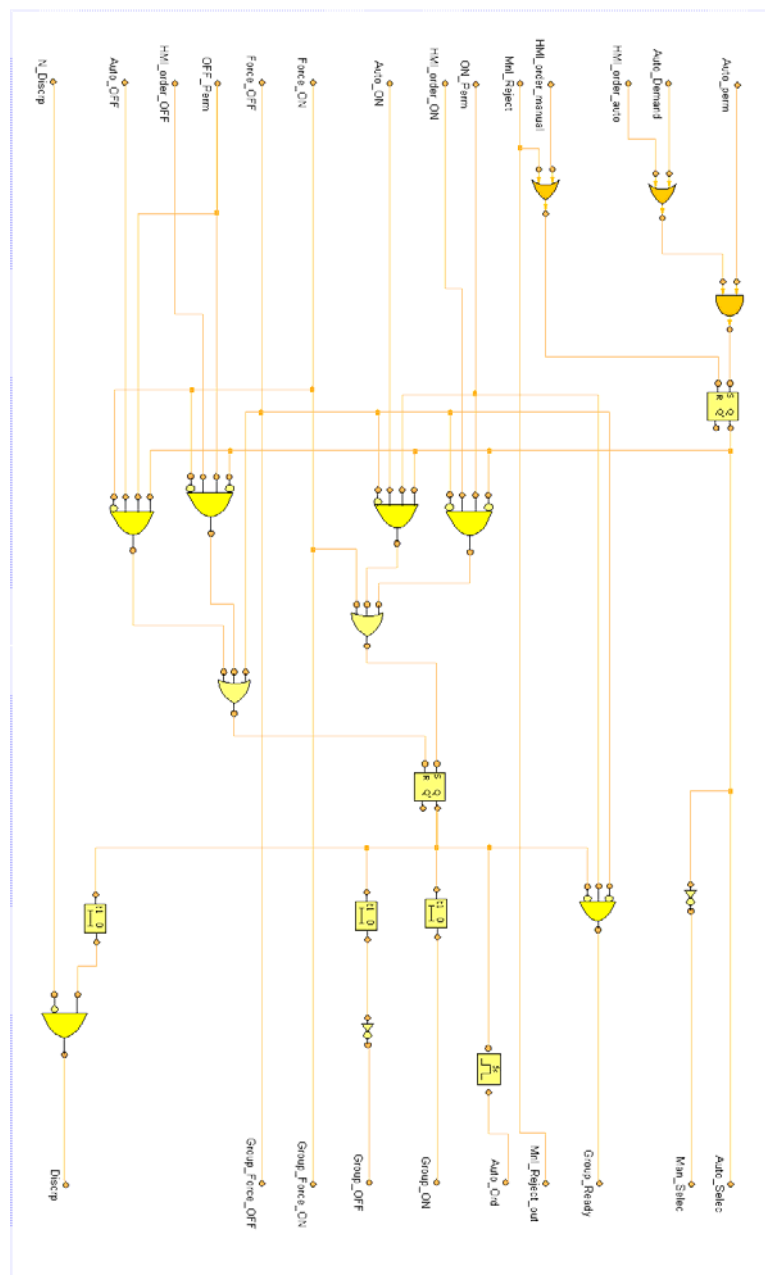


Figura 23. Esquemático de la macro del grupo funcional

4.6.2 Señales de la macro del grupo funcional

Aunque el funcionamiento de esta macro es bastante intuitivo, pues su objetivo es habilitar o deshabilitar subgrupos de accionamientos, y habilitarles la posibilidad de

recibir y enviar órdenes al SCD, se expondrán las señales que no se hayan mencionado en anteriores macros.

Auto-ON: Activa el modo automático, y da permiso para el funcionamiento en este modo a las jerarquías inferiores que estén bajo el control de este grupo funcional. Para que esta señal tenga efecto, se necesita que el permisivo de activación (**ON-Perm**) esté activado.

Auto-OFF: Desactiva el modo automático, y por lo tanto cambia a modo manual o incluso desactiva, aquellos accionamientos que se encuentren en jerarquías inferiores y bajo el control de este grupo funcional. Para que esta señal tenga efecto, se necesita que el permisivo de desactivación (**OFF-Perm**) esté activado.

Forzado a ON (ON-Force): Tiene el mismo objetivo que la señal de Auto-ON, con la excepción de que a ésta no le hace falta tener permisivo de activación.

Forzado a OFF (OFF-Force): Tiene el mismo objetivo que la señal Auto-OFF, con la diferencia de que a ésta no le hace falta disponer de permisivo de desactivación.

No discrepancia: Avisa al grupo funcional de que ninguno de los accionamientos que controla tiene alguna discrepancia (por ejemplo una válvula que tuviera discrepancia en la posición).

Las señales de salida de esta macro, además de enviar los comandos ON y OFF a las jerarquías inferiores, son indicaciones del estado del grupo funcional. Así por ejemplo se informa de si está seleccionado el modo manual o automático, de si el grupo se ha forzado a su activación o desactivación, etc. La señal **Grupo Preparado** (Group Ready) la recibe el SCD para saber que el grupo funcional en cuestión, se encuentra desactivado y sin ninguna discrepancia ni anomalía, y por lo tanto está a la espera de una orden de ON para activarse.

4.7 Macro para el selector de dos actuadores

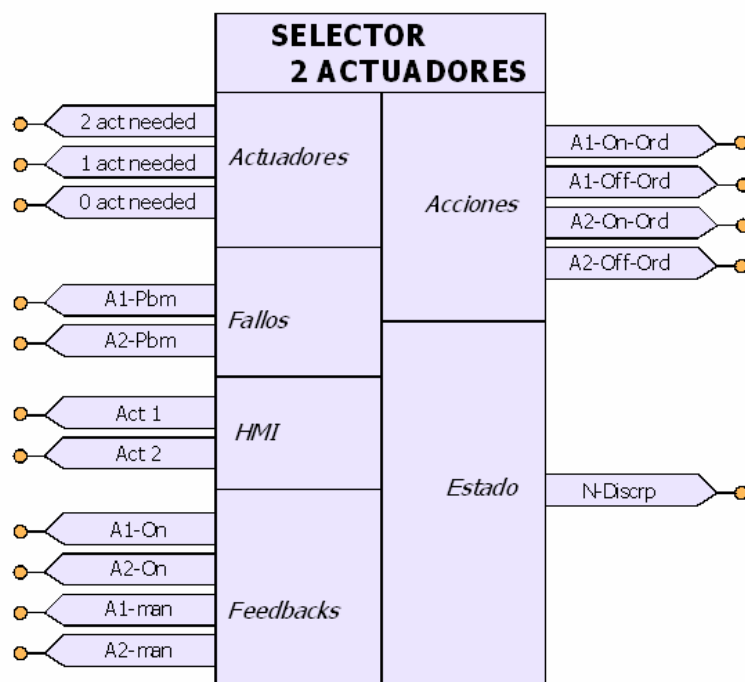


Figura 24. Símbolo de la macro del selector de dos actuadores

Tal y como ya se ha explicado, en este sistema existen dos grupos. Uno de ellos está funcionando normalmente mientras otro permanece en reserva por si el operativo tuviera alguna emergencia. El objetivo de esta macro es por tanto, permitir al grupo funcional de mayor jerarquía, seleccionar entre los dos subgrupos disponibles (cada uno de estos grupos está compuesto por los accionamientos descritos en el capítulo 3 del proyecto). El operario puede decidir manualmente cuál de estos subgrupos permanecerá en reserva y cual será el que tenga prioridad para funcionar al arrancar todo el sistema. En determinadas situaciones, aunque no es el caso en el sistema de agua de alimentación del cual es objeto este proyecto, ambos subgrupos deben funcionar simultáneamente y por lo tanto el selector deberá habilitar a los dos al mismo tiempo. Al mismo tiempo, el selector debe ser capaz de cambiar automáticamente y activar el grupo de reserva, siempre que el activo sufra alguna emergencia y deba ser desactivado.

4.7.1 Esquemático del selector de 2 actuadores

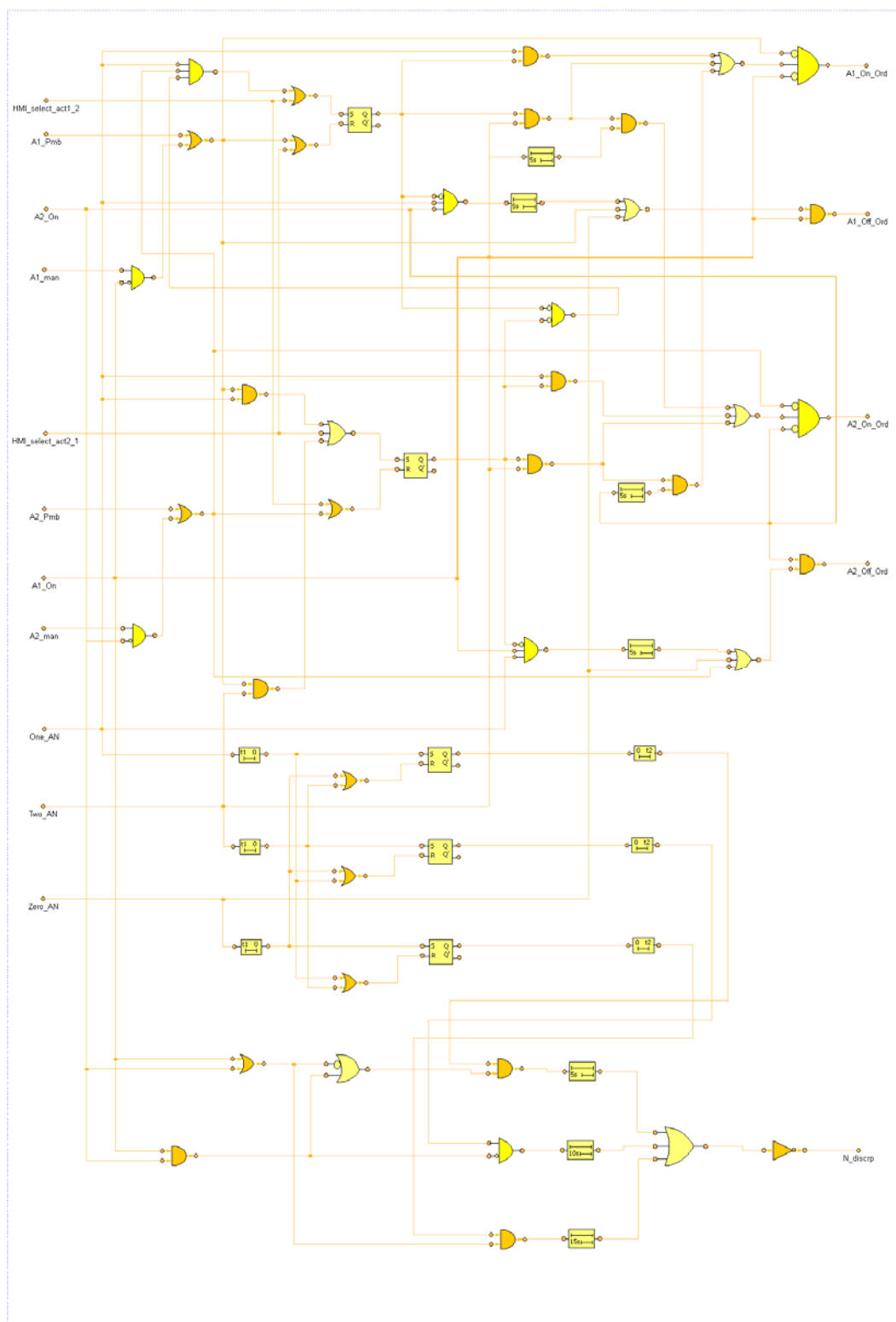


Figura 25. Esquemático de la macro del selector de dos actuadores

4.7.2 Señales del selector de dos actuadores

Antes de recibir la orden que indique que se necesita uno de los dos actuadores, que normalmente proviene de un grupo funcional de mayor jerarquía, un operador debe haber seleccionado manualmente cuál de ambos va a ser el activo (lead) y cual va a permanecer en reserva (lag). Esta operación se realiza emitiendo un pulso por uno de los puertos de entrada **Act 1** o **Act 2**. Una vez se ha realizado esta preselección, el selector está preparado para activar un actuador, ambos, o ninguno si no fuera necesario. Esta configuración se realiza a través de las entradas **0 actuadores requeridos** (0 act needed), **1 actuador requerido** (1 act needed) y/o **2 actuadores requeridos** (2 act needed). Tras saber qué actuador o actuadores deben ser inicializados, la macro activa las salidas **A1-On-Ord** y/o **A2-On-Ord** según fuese conveniente. Cuando un grupo funcional desea desactivar un subgrupo, también realiza esta acción a través del selector, y éste lleva a cabo dicha acción a través de los puertos **A1-Off-Ord** y **A2-Off-Ord**.

El selector también recibe feedbacks de si los actuadores, o subgrupos funcionales jerárquicamente inferiores, están activados o si están en modo manual. De la misma manera, envía una señal de discrepancia al grupo funcional superior si se da una de las tres situaciones:

- Se requiere un actuador y tras 5 segundos no está activado.
- Se requieren dos actuadores y tras 10 segundos no están ambos activados.
- No se requiere ningún actuador, y tras 15 segundos permanece al menos uno activado o ambos.

Esta señal se debe conectar al grupo funcional de mayor jerarquía para que rechace a manual el sistema, y el operador compruebe en persona a qué se debe este mal funcionamiento.

Capítulo 5

Control del sistema

5.1 Aspectos generales del control

Una vez se han introducido las macros que usaremos en el control del sistema de agua de alimentación, se procede a explicar de qué manera son controlados los accionamientos que forman parte del mismo.

Tal y como especifica el libro “*Centrales térmicas de ciclo combinado, Teoría y Proyecto*” [4], el sistema de control de una central de ciclo combinado debe diseñarse para que toda la operación se encuentre centralizada en la sala de control y sin la necesidad a priori de actuaciones locales. En la sala de control se recogerá la información más relevante de la central que será plasmada en una interfaz gráfica como la que se ha diseñado en el capítulo 7 de la presente memoria. El sistema de control además, debe ser abierto, permitiendo la posibilidad de integrar el control de subsistemas externos, a través de otros PLC.

Toda esta lógica, además de las macros, se programaría directamente en el sistema de control distribuido (SCD). Es habitual en la práctica, que los ingenieros encargados de realizar esta programación lógica en la oficina, deban desplazarse al lugar donde la empresa encargada de suministrar el SCD programe la lógica. Estas pruebas de verificación de que todo lo programado en la empresa se encuentra correctamente implementado en el SCD se conocen como FAT (Factory Acceptance Tests).

5.2 Control analógico y regulación

Todos los accionamientos de este sistema son monitorizados y por lo tanto controlados desde las pantallas de operación que se encuentra en la Sala de Control Principal (CCR: Central Control Room). El sistema incluye estaciones automáticas-manuales para llevar a cabo no sólo el mando sino la supervisión de las estaciones de regulación. Mediante estas estaciones automáticas-manuales, se puede modificar el punto de consigna y que un operador actúe directamente sobre el elemento final. En nuestro caso, esto correspondería a aumentar manualmente la demanda de agua hacia el calderín de media presión.

Los controles analógicos del sistema son los siguientes:

- Demanda de Agua de alimentación al calderín de media presión:

Se debe satisfacer la demanda de agua hacia el calderín de PI en todo momento y en tiempo real, sin grandes retrasos que provoquen que este calderín disminuya drásticamente su nivel. Estos aumentos de demanda de agua, se pueden producir al demandar la turbina de vapor más vapor, y por lo tanto necesitar la caldera más agua proveniente del sistema de agua de alimentación.

- Caudal de mínima recirculación de las bombas de agua de alimentación de media presión:

La variable de proceso es en este caso, el caudal a la descarga de ambas bombas que alimentan el calderín de media presión. En ningún momento el caudal que circula a través de la bomba en funcionamiento debe ser menor a 13 kg/s, y por lo tanto, si no estamos demandando agua hacia el calderín de PI, la válvula de recirculación debe regular su sección de paso para permitir este flujo de vuelta al calderín de BP.

5.3 Control lógico

Como se ha explicado anteriormente en la descripción mecánica, el sistema de agua de alimentación tiene dos líneas dotadas cada una de ellas con una bomba, una válvula de control para la mínima recirculación y una válvula que evita el retorno del fluido a la descarga de la bomba. Estas líneas son totalmente independientes la una de la otra, esto significa que en condiciones de operación normales, sólo trabaja una de las dos líneas, lo que se denomina tener una capacidad del 100%.

El control lógico de este sistema es jerárquico, en el siguiente diagrama se muestra la jerarquía que sigue la lógica del sistema de agua de alimentación.

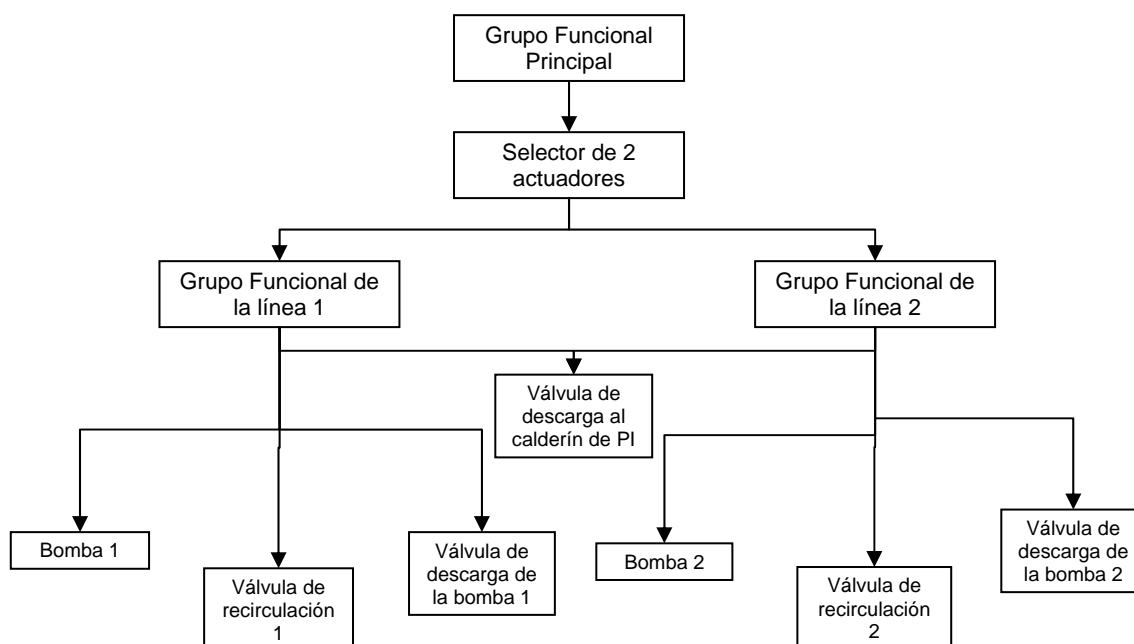


Figura 26. Jerarquía del control del sistema de agua de alimentación

Como se ve en la figura 26, en la cúspide del control se encuentra el grupo funcional principal, del cual cuelgan el resto de componentes. A continuación se hará una descripción de las principales funciones que realizan estos elementos en el sistema.

El grupo funcional principal, es el encargado de generar las ordenes de demanda de modo automático, y arrancar el sistema en el caso de que se cumpla su permisivo de arranque que consiste en que el nivel en el calderín de baja presión no sea demasiado bajo. Los permisos para enviar la señal de modo automático a los grupos funcionales de cada línea, y por lo tanto activar el modo automático en todos los accionamientos que vayan a operar se generan cuando se da la situación siguiente: el grupo funcional de la línea 1 está operativo (señal *Group_ON*) o preparado (señal *Group_Ready*) y el grupo funcional de la línea 2 está operativo o preparado y el nivel en el calderín de BP no es muy bajo. Los permisos para forzar a un apagado total del sistema, deben ser siempre un valor booleano *TRUE*, pues esta señal se generará cuando haya una emergencia que pudiera provocar daños en el sistema, y no es seguro hacer comparaciones previas que pudieran inhabilitar la parada del sistema. Las dos situaciones ante las que pararíamos completa e inmediatamente el sistema, son un alto nivel de presión y un muy bajo nivel de agua en el calderín de BP.

Con la ayuda de la macro del selector de dos actuadores, se elegirá la línea que se quiere que opere en primer lugar, al recibir la orden de arranque del sistema, y por lo tanto cual de las dos debe permanecer en reserva por si la línea prioritaria sufriera alguna emergencia y fuera disparada. La señal de salida de apagado de grupo (señal *Group_OFF*) del grupo funcional principal, se conecta a la señal de entrada de la macro del selector de dos actuadores de 0 actuadores necesarios (*0-act-needed*). La señal de encendido de grupo (señal *Group_ON*) se conecta a la señal de 1 actuador necesario (*1-act-needed*). En nuestro caso, actuando como operador de la planta, se ha seleccionado prioritaria la línea 1 y de reserva la línea 2. Los *feedbacks* que recibe el selector de cada una de las líneas es por una parte si la línea está en funcionamiento, para lo que hemos empleado las señales de arrancado (señal *running*) de cada bomba, y por otro lado si alguna de las líneas ha disparado (señales *Override Trip*). En el momento en que el selector detecta que la línea en funcionamiento ha disparado, cambia inmediatamente de línea para restablecer el caudal de agua. Desde el selector de dos actuadores, se generan las órdenes de arranque y parada, que tienen como destino cada uno de los grupos funcionales de cada línea.

Por lo tanto, se ha creado un esquemático, con su símbolo correspondiente (ver figura 27) en el que se engloban las macros y la lógica de una de las líneas, y posteriormente sólo tendríamos que copiar este elemento creado, con las señales de entrada y salida que tienen conexión con el grupo funcional principal, el selector de dos actuadores y con el propio esquemático del sistema mecánico. Ejemplos de señales que provienen del esquemático del sistema mecánico son la demanda de agua hacia el calderín de PI (en kg/s), o la medida de caudal a la salida de la bomba, que actúa como variable de proceso que controla la válvula de mínima recirculación. Al mismo tiempo, la lógica de la línea debe enviar hacia el sistema mecánico la señal de posición de la válvula de recirculación y de la válvula en la descarga de la bomba. Respecto a la interfaz con el nivel jerárquico superior de la lógica, o sea el grupo funcional principal y el selector de dos actuadores, corresponden el resto de señales digitales que componen este símbolo.

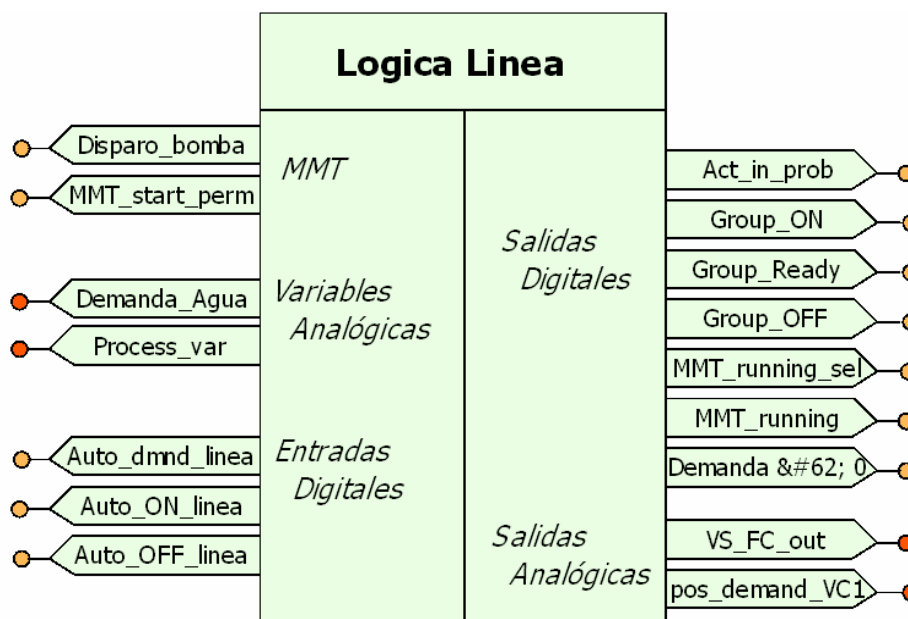


Figura 27. Símbolo de la lógica para una línea del sistema

El nivel jerárquico superior en este esquemático, lo tendría el grupo funcional de línea. Previamente, si no se ha detectado ningún fallo en el sistema, el grupo funcional principal habrá establecido en todos los actuadores de la línea el modo automático, por lo que las órdenes provenientes del sistema de control distribuido tendrán prioridad inhabilitando las órdenes que un operador desde la sala de control pudiera dar. Tras recibir la orden de arranque por parte del selector, procedería a iniciar la secuencia de arranque del sistema. En esta secuencia de arranque, primero se abriría la válvula de mínima recirculación, para unos segundos después arrancar la bomba y permitir que el agua que ésta impulsa tenga salida. La válvula a la descarga de la bomba, debe permanecer cerrada hasta que se detecte una demanda de agua hacia el calderín de PI. En ese instante, y sólo si la bomba está en funcionamiento, se procederá a la total apertura de esta válvula y por lo tanto, el sistema estaría bombeando agua al calderín de PI.

En la siguiente imagen, se muestra la colocación de las macros, y la lógica complementaria que se ha diseñado para conectarlas.

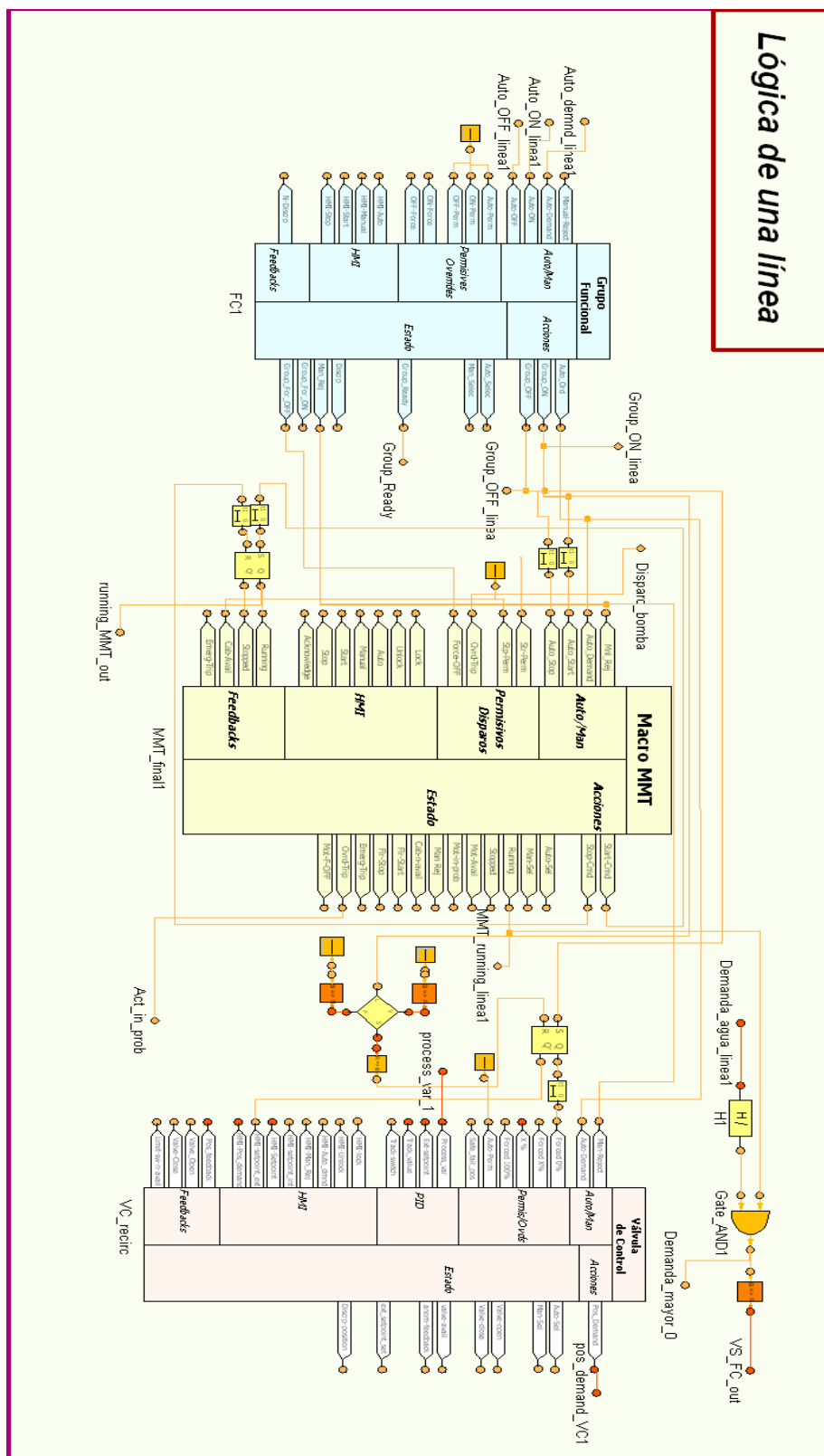


Figura 28. Esquemático de la lógica de una línea

Finalmente, se debe unir la lógica de ambas líneas, con el grupo funcional superior, el selector de dos actuadores, sin olvidar la válvula de control que rige el caudal

que circula hacia el calderín de PI. La siguiente imagen muestra el esquema final de control:

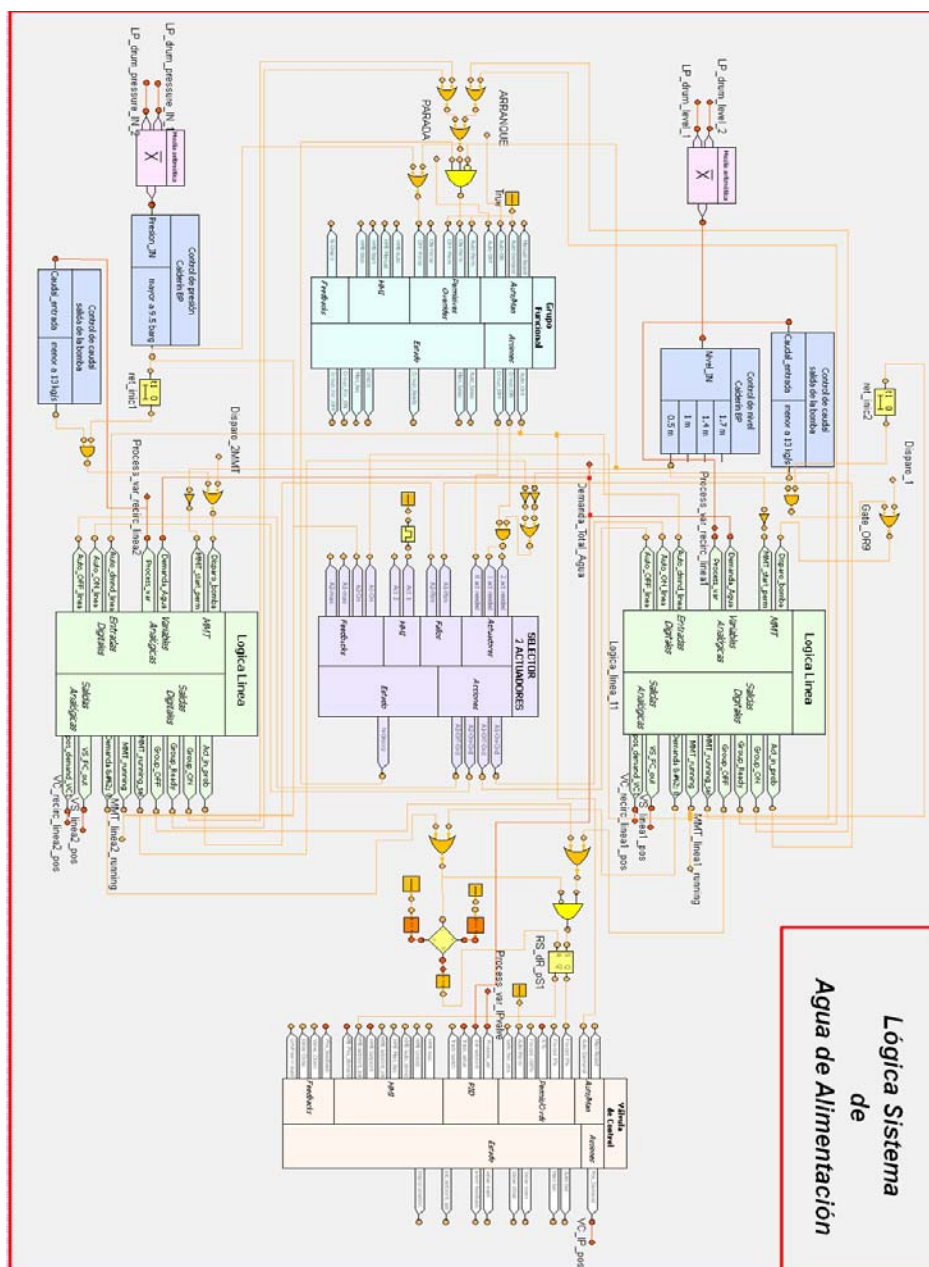


Figura 29. Lógica global del sistema de agua de alimentación

La válvula de control que descarga agua en el calderín de PI, permanece cerrada durante el arranque del sistema. Cuando comienza a demandarse agua, y siempre que una de las bombas esté en funcionamiento, el PID que incorpora la macro de la válvula comenzará a controlar la posición a la que esta debe situarse, dejando atravesar sólo el caudal que el calderín demande.

El resto del esquemático lo componen los comparadores de nivel y presión en el calderín de BP, y de los comparadores de caudal de mínima recirculación de cada una de las líneas. Para realizar las comparaciones de nivel y presión se ha utilizado el componente *media*, que como su nombre indica, realiza la media aritmética entre los dos valores de entrada.

Si el comparador de caudal envía una señal de bajo caudal a la salida de la bomba, ésta se disparará, rechazando toda esa línea a modo manual y enviando, a través del selector de dos actuadores, la orden de arranque de la línea de reserva, que en nuestro caso es la 2. El motivo del rechazo a manual de una línea tras un disparo queda claro en este ejemplo de agua de alimentación, pues así se evita que el sistema de control distribuido pudiera enviarle una orden de arranque por error, y existiendo un problema físico en la línea, esta arrancara de nuevo, con el riesgo que eso conllevaría. Así pues, la línea disparada y en modo manual, debe ser rearmada manualmente por un operador, antes de volver a estar operativa para recibir órdenes del SCD.

5.4 Unión del sistema mecánico y de control

El último paso es unir los esquemáticos de control (figura 29) y el esquemático del sistema mecánico (figura 11), a los cuales hemos creado símbolos que den una idea gráfica del significado de sus señales de entrada y salida, facilitando así el interconexión entre ambos.

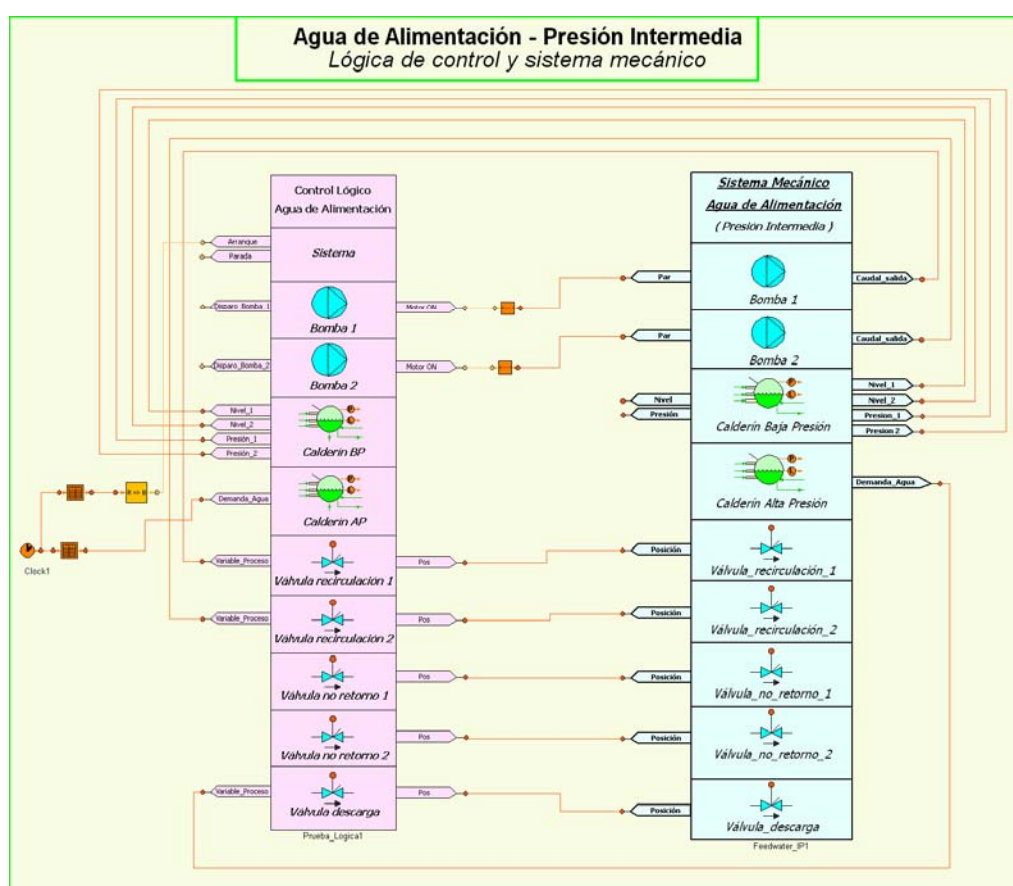


Figura 30. Lógica de control y sistema mecánico

En la anterior figura se muestra el esquemático final del sistema de agua de alimentación. En él se observan componentes de la librería de control, que ya no forman parte de la lógica del sistema, sino simbolizan otro tipo de parámetros, como por ejemplo los dos bloques *BooleantoReal* que lo que simbolizan es el valor que adoptará el par mecánico (en N*m) del motor de la bomba cuando se le transmita la orden de arrancar. También se ha añadido un reloj, unido a dos tablas, con las que podremos simular demandas variables de agua, paradas inesperadas del sistema en instantes de tiempo que

deseemos, o un arranque del sistema automático sin que tengamos que dar la orden nosotros manualmente.

El motivo de crear este esquemático, es facilitar la comprensión para que una tercera persona pueda usar los bloques de la lógica de control y el sistema mecánico por separado, sin necesidad de profundizar en los componentes internos que lo forman. Se consigue así una portabilidad de estos sistemas de una manera sencilla y flexible.

Capítulo 6

Simulaciones

6.1 Resultados obtenidos

En este capítulo, se muestran una serie de simulaciones de situaciones reales del sistema de agua de alimentación en una central de ciclo combinado, utilizando el simulador *EcosimPro Monitor* y nuestro modelo implementado de este sistema.

Aunque se han realizado gran cantidad de simulaciones durante el desarrollo del proyecto, sólo se expondrán las más representativas y las que desde nuestro punto de vista fuerzan una situación crítica y de emergencia, en la que se demuestre verdaderamente la potencia y la eficacia del sistema de control implementado. Al mismo tiempo, se verificará si las macros de control han sido bien programadas.

En primer lugar, sería conveniente comprobar, como tras recibir la señal de arranque, el grupo funcional principal envía la orden de cambiar a modo automático los grupos funcionales de cada una de las líneas, habilitando así el control por parte del sistema de control distribuido.

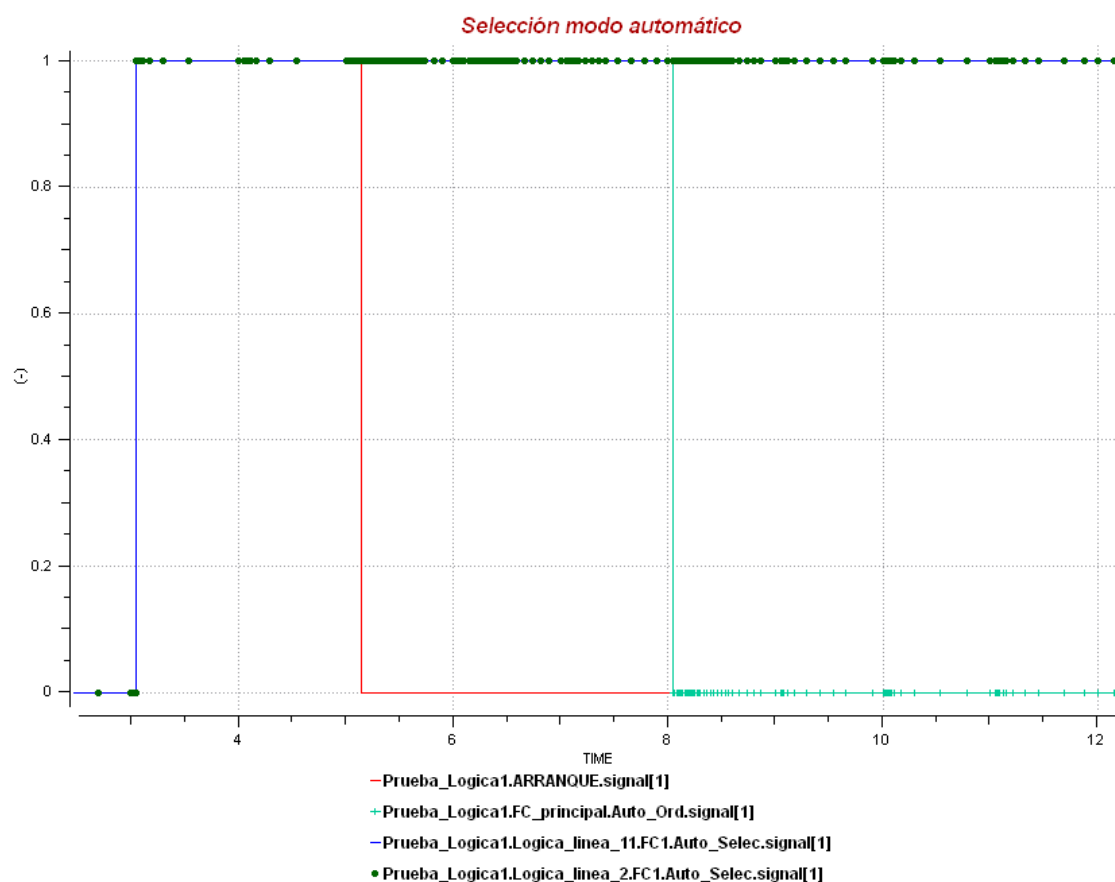


Figura 31. Simulación del arranque del sistema

La figura 31 muestra, como en el segundo 3 se emite un pulso de arranque (línea roja) e inmediatamente el grupo funcional principal (línea '+' en verde suave) genera la señal de cambiar a modo automático. En el mismo instante, sin ningún retraso, los grupos funcionales de la línea 1 y 2 (línea azul y línea punteada verde fuerte) cambian a modo automático, e incluso después de que el pulso con la orden de cambiar a modo automático cambie su valor a *False* (0 lógico), estas señales permanecen en el estado *True* (1 lógico).

Al mismo tiempo que se activa el modo automático, tras recibir la orden de arranque el grupo funcional principal, este selecciona un actuador en la macro del selector. En este instante, el selector, que tiene seleccionado como prioritaria la línea 1, envía la orden de arranque a esta línea, comenzando así la secuencia de arranque. Como se explicó en el capítulo del control lógico, esta secuencia primero abre la válvula de control de mínima recirculación, controlada por el PID incorporado en la macro y dos

segundos después arranca la bomba, estabilizando su caudal de salida, con ayuda de la válvula de mínima recirculación, en un valor de 13 kg/s. En la siguiente figura se aprecia como el PID de la válvula actúa de manera suave regulando el caudal, sin producir ninguna sobre oscilación sobre los 13 kg/s teniendo como consecuencia una respuesta más lenta.

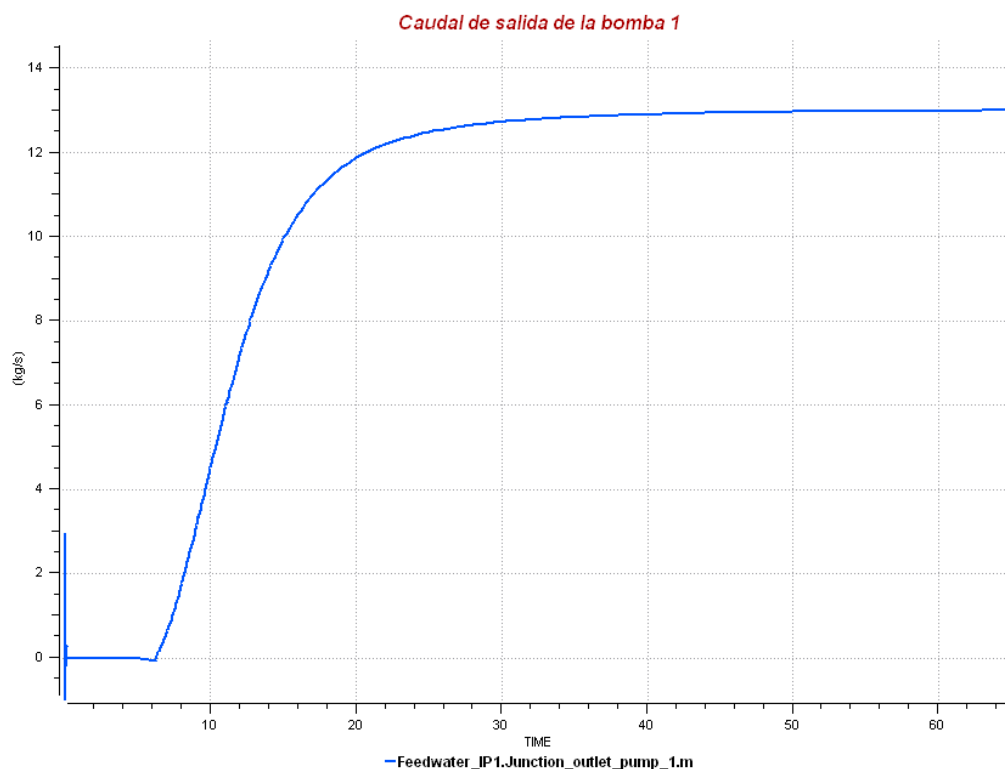


Figura 32. Caudal de salida de la bomba 1

Sin embargo, este factor no es crítico en el arranque de la bomba, por lo que preferimos una respuesta lenta, que se traduzca en un retraso de varios segundos en alcanzar el valor de consigna, a grandes sobre oscilaciones. En la siguiente imagen, vemos como la línea roja representa el valor de consigna (*setpoint*) de 13 kg/s y como el caudal de salida de la bomba se acerca lentamente a este valor sin sobreoscilar. Estas filosofías de diseño en el control y selección de los parámetros de los PID's se han extraído de la teoría del libro “*Ingeniería de Control, modelado y control de sistemas dinámicos*” [5].

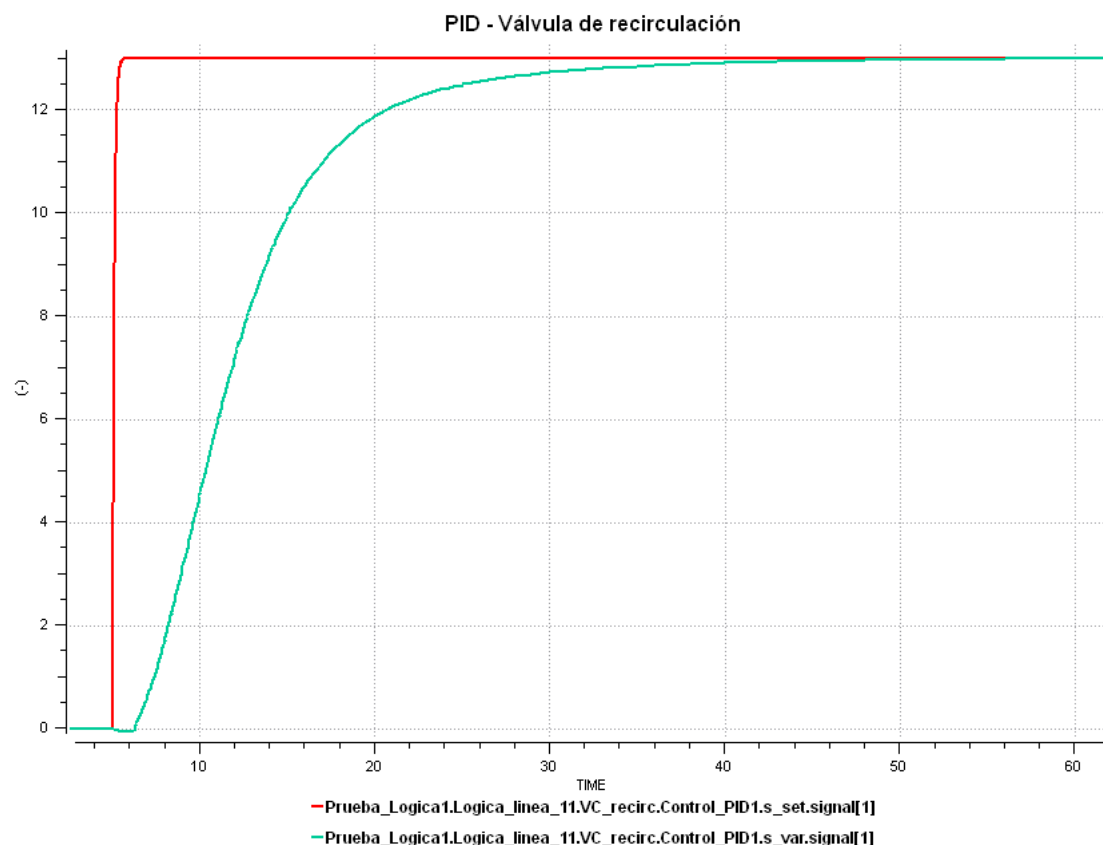


Figura 33. PID de la válvula de recirculación

A continuación, simularemos una demanda variable de agua hacia el calderín de presión intermedia, con rampas de subida y bajada en instantes aleatorios de tiempo, para visualizar la respuesta de nuestro sistema de control. Aunque esta situación tan extrema no se daría en una central real, las rampas de subida/bajada son en la realidad menos pronunciadas, hemos querido llevar al sistema a una situación extrema, para ver si realmente funcionaría ante una situación de emergencia.

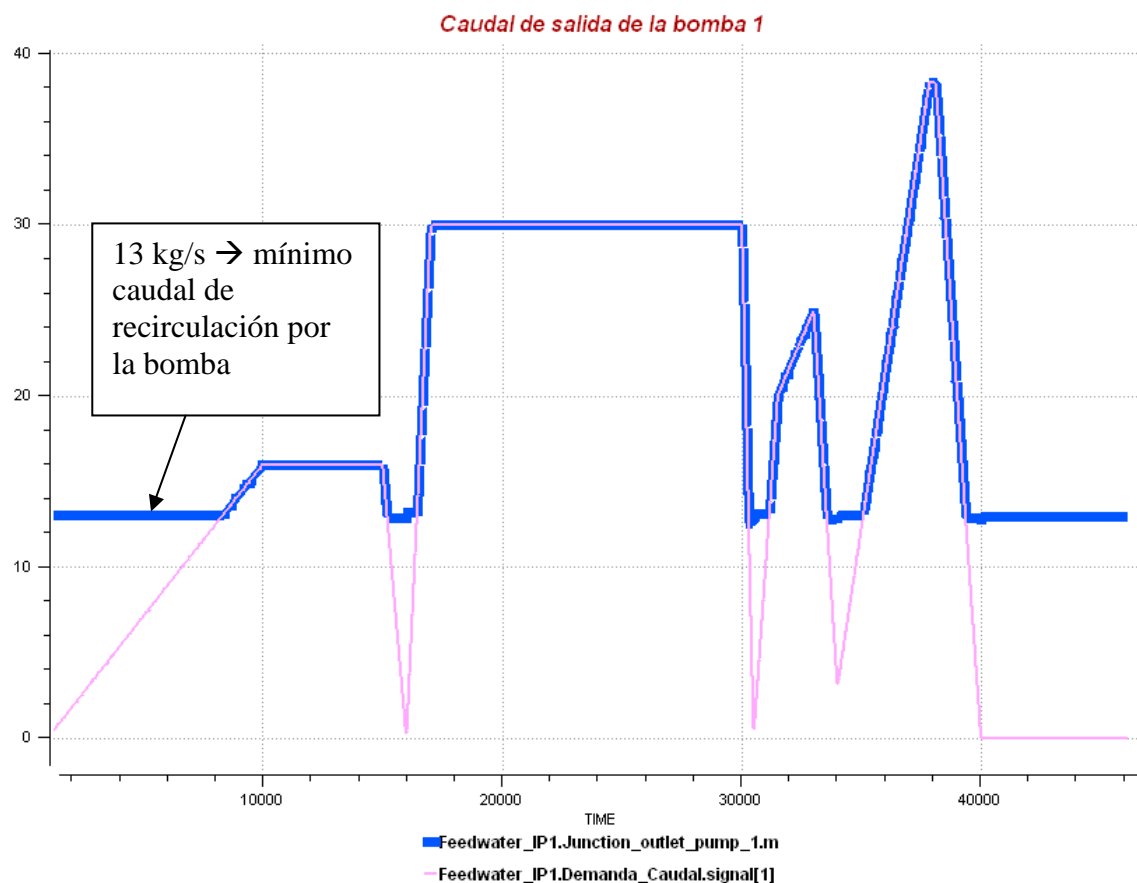


Figura 34. Demanda variable hacia el calderín de PI

En la gráfica se muestra el caudal de salida de la bomba de la línea 1 (línea azul), que es la que está en funcionamiento, y la línea rosa representa la demanda de caudal hacia el calderín de PI. En el arranque del sistema, tal y como se muestra en las gráficas anteriores, el caudal que da la bomba es de 13 kg/s, pues es el caudal que ha sido impuesto como de mínima recirculación. Cuando la demanda de agua comienza a subir, pero su valor aún es inferior a 13 kg/s, el caudal por el circuito de recirculación comenzaría a disminuir y empezaría a impulsarse agua hacia el calderín de PI. Sin embargo la bomba, no vería aumentado su caudal de salida de 13 kg/s porque la demanda aún es inferior a este valor. Al ir aumentando la demanda, se observa como el caudal en la bomba debe también aumentar, en este preciso instante, el caudal por la válvula de circulación, tal y como se muestra posteriormente en una gráfica, debe ser cero, pues ya no es necesario estar recirculando agua. Se aprecia como la demanda de agua se satisface con una rápida respuesta y de manera precisa por la bomba. También se podrá comprobar el buen funcionamiento de la válvula de mínima recirculación, al caer la demanda bajo

valores de 13 kg/s, vemos como el bombeo de agua se mantiene constante en este valor, y ese flujo se estaría recirculando de nuevo hacia el calderín de BP.

En la siguiente imagen se demuestra como el caudal de recirculación, que tras el arranque del sistema permanece estable en un valor de 13 kg/s, comienza a disminuir al mismo tiempo que aumenta la demanda de agua hacia el calderín de PI. Desde el momento que la demanda supera la consigna de 13 kg/s, el agua no es recirculada hacia el calderín de BP. Los picos de caudal que se ven en la imagen, corresponden a los instantes en los que la demanda de agua disminuye de 13 kg/s y por lo tanto, ese exceso de agua producido por la bomba, debe ser de nuevo recirculado. Al final de la simulación, cuando la demanda vuelve a ser de nuevo nula, observamos como la válvula vuelve a colocarse en la posición que permite el paso de los 13 kg/s de agua.

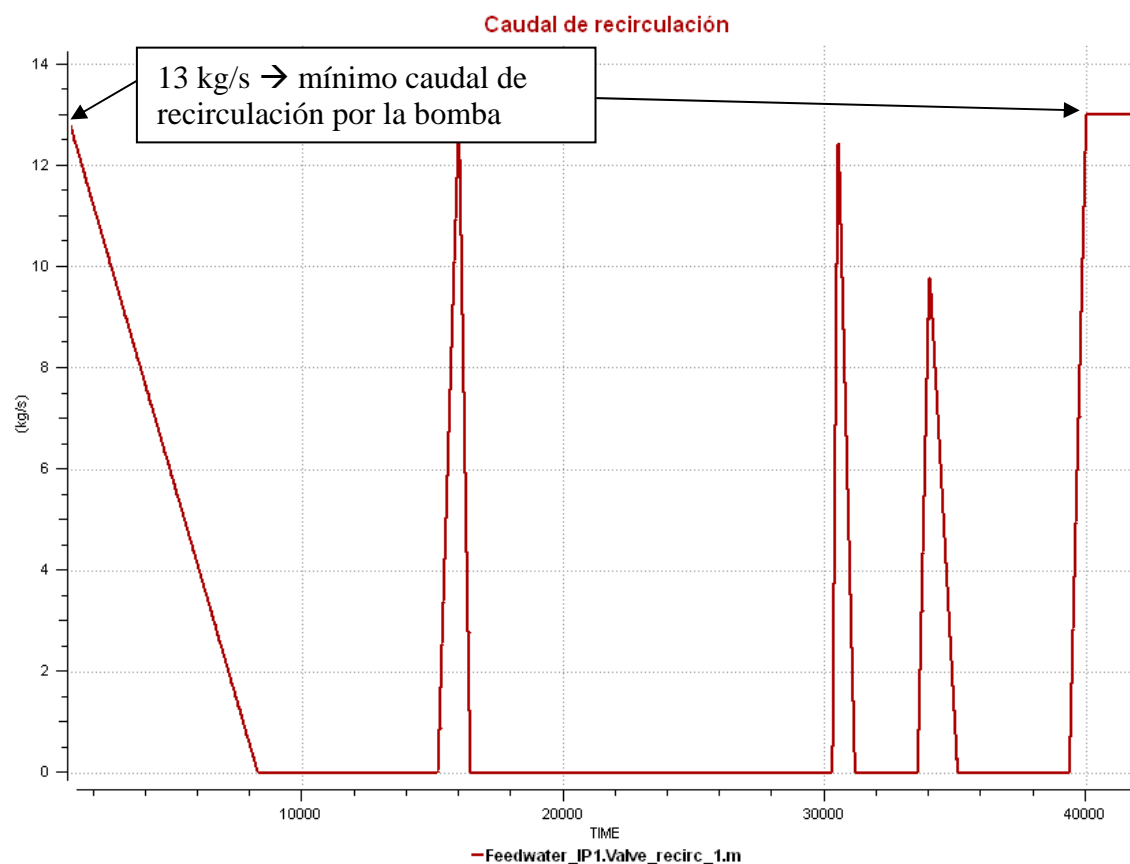


Figura 35. Caudal de recirculación

6.2 Disparo de la bomba activa

Una de las situaciones más adversas que se pueden encontrar en el sistema de agua de alimentación, es que por algún problema mecánico, eléctrico o de otra índole, una de las bombas, o cualquier otro accionamiento de la línea fallen, y por lo tanto esa línea tenga que parar su funcionamiento. Si se parase el sistema por completo, no se suministraría agua al calderín de PI, disminuyendo su nivel rápidamente y provocando una parada total de la central de ciclo combinado. Por ello la lógica de control juega un papel fundamental en este tipo de situaciones, en la que se requiere una respuesta inmediata, y en la que un operador humano tardaría muchos más segundos en reaccionar ante una situación de emergencia como ésta.

En el ejemplo de la siguiente simulación, se produce un disparo de la bomba de la línea 1 (su caudal se muestra en azul en la simulación), que es la que está aportando agua al calderín de PI, mientras la bomba de la línea 2 (su caudal se muestra en verde en la simulación) se encuentra en reposo. En ese preciso instante, y con tan sólo varios segundos de retraso, el caudal que demanda el calderín de PI (línea rosa en la simulación) es repuesto con precisión. A partir de ese instante, toda la línea 1 está rechazada a manual, para que un operador humano compruebe que ha fallado, y la línea 2 permanece en funcionamiento siguiendo las variaciones en la demanda de agua.

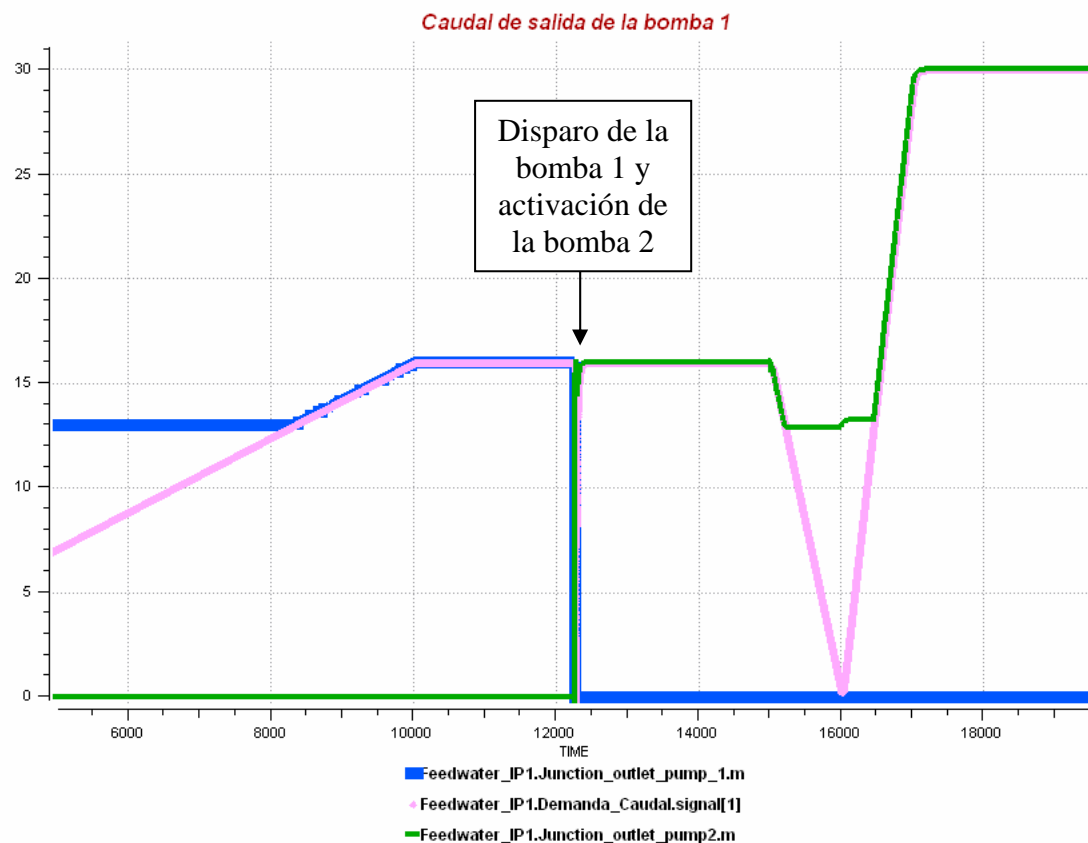


Figura 36. Disparo de la bomba activa y arranque de la bomba de reserva

Se ha conseguido que la restauración del caudal sea prácticamente instantánea, cuestión de varios segundos, tal y como ocurre en la realidad. Por lo tanto, tanto los típicos de control como la lógica implementada, funcionan correctamente, con una respuesta rápida y de alta precisión similar a la situación real.

Capítulo 7

Interfaz gráfica en Excel

7.1 Interfaz gráfica

Tras finalizar las simulaciones y haber comprobado que el sistema de control implementado se corresponde con la realidad, se llega al último objetivo del proyecto. La creación de una interfaz gráfica que aporte más realismo al mismo, y facilite el uso del proyecto a personas sin conocimientos sobre EcosimPro.

En una central térmica, al igual que en la mayoría de sectores industriales, existe una sala de control central (CCR) en la que el operario puede visualizar todos los sistemas de la misma, y toda la información relevante que los componen. Así por ejemplo, si el operario detectara alguna anomalía, alguna variable de proceso fuera de rangos, o simplemente quiera monitorizar el estado de algún componente mecánico, sólo debe moverse por una sencilla interfaz gráfica implementada en Excel.

La segunda ventaja que ofrece una interfaz gráfica, en el ámbito de la empresa que programa los típicos de control e implementa el control de un sistema físico, es el de poder exportar estos resultados a otros ingenieros que no dominen el software EcosimPro, pudiendo visualizar el funcionamiento del sistema sin necesidad de tener conocimientos sobre el software.

Para ello, se han exportado los datos de la simulación desde EcosimPro en una hoja de Excel. Esta hoja de Excel, además de representar gráficamente el sistema de agua de alimentación, proporciona botones que permiten cambiar el valor de cualquier variable del sistema (por ejemplo parar una bomba, abrir una válvula, etc). Para dotar a los botones de estas propiedades se han programado comandos básicos en Visual Basic siguiendo las instrucciones del libro “*Visual Basic .NET, Curso de Programación*” [6].

Estas instrucciones van desde el cambio del estado de alguna variable del sistema pulsando el correspondiente botón, al cambio entre pantallas gráficas de forma rápida.

En el presente proyecto, se ha creado una interfaz gráfica del sistema de agua de alimentación, que refleja esquemáticamente sus componentes principales, tal y como muestra la figura 37.

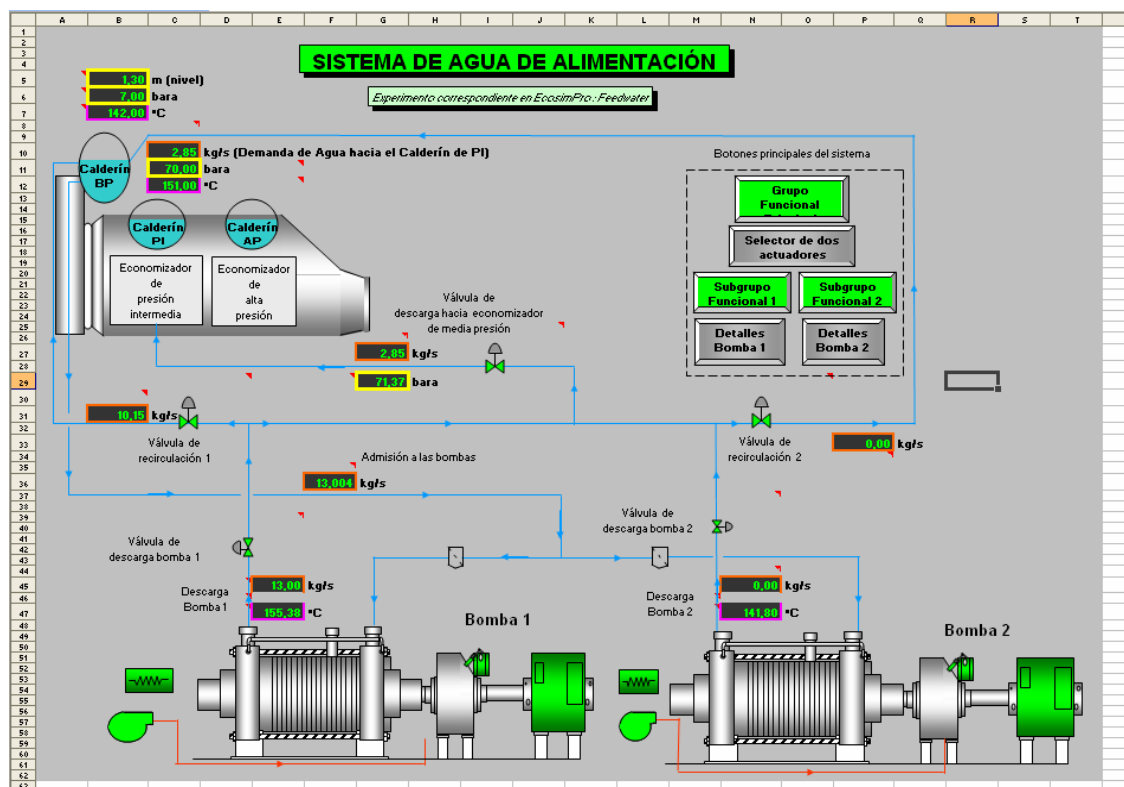


Figura 37. Interfaz gráfica en Excel

En la anterior figura, se ve como el sistema de agua de alimentación evoluciona según la demanda de agua demandada hacia el calderín de PI, mostrando las presiones, temperaturas y caudales más característicos del sistema. Muestra en concreto una situación en la que se está demandando hacia el calderín de presión intermedia 2,85 kg/s. Para aportarlos, la bomba aspira desde el calderín de baja presión e impulsa un caudal de 13 kg/s, su caudal de mínima recirculación. Como hacia el calderín sólo queremos que circulen 2,85 kg/s, los restantes 10,15 kg/s son reconducidos de vuelta hacia el calderín de BP a través de la válvula de recirculación 1. Se comprueba también, como la segunda bomba permanece en reserva, sin participar en el aporte de agua hacia el calderín de mayor presión.

Desde esta pantalla principal, también el operario tendría acceso, al pulsar el botón “detalles bomba 1” o “detalles bomba 2”, en la que visualizaría en qué estado se encuentra cada una de las bombas, las alarmas que han surgido, si ha disparado o cual de ambas está en funcionamiento. Esto se muestra en la figura 38.

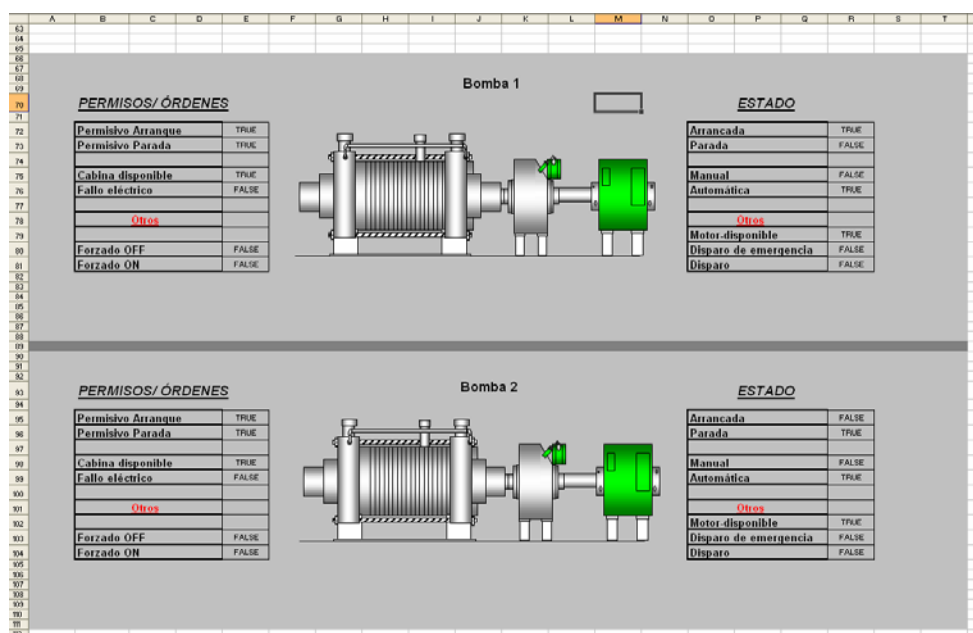


Figura 38. Detalles de las bombas en Excel

En este caso en concreto, se muestra como es la bomba 1 la que está funcionando, permaneciendo la segunda en reserva. Ninguna de las bombas ha sufrido ninguna avería ni ningún disparo. Además se muestra el modo de funcionamiento de cada una (automático o manual) al igual que el resto de estados característicos de las bombas. Es necesario y útil una pantalla que aporte este tipo de información sobre las bombas, pues estos equipos mecánicos son de vital importancia para el sistema, además de suponer un coste económico muy grande, por lo que el operador debe tener información en tiempo real del estado de las mismas.

Por último, se muestra en la figura 39, como EcosimPro exporta todos los datos de la simulación de cualquier variable que se quiera visualizar, con su valor correspondiente para cada instante de tiempo. Esto permitiría realizar gráficas de tendencias e informes detallados sobre el comportamiento de cada sistema, para así poder analizarlos y proceder a la mejora en su diseño.

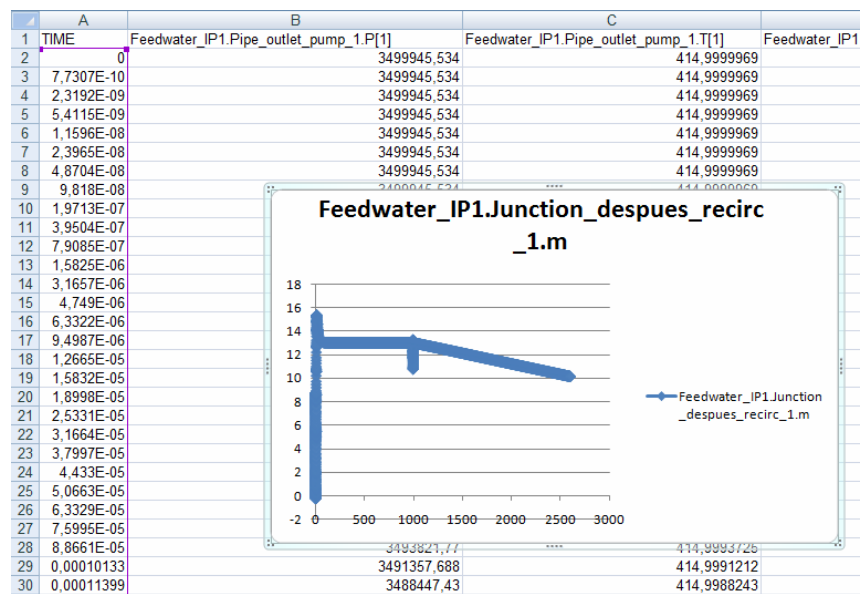


Figura 39. Exportar datos desde EcosimPro hacia Excel

Capítulo 8

Conclusiones

8.1 Conclusiones

A lo largo del periodo en el que se han realizado las prácticas en Empresarios Agrupados coincidiendo con el desarrollo de este proyecto fin de carrera, no sólo se ha adquirido experiencia en el manejo de nuevas aplicaciones software como EcosimPro, o conocimientos sobre el papel de la ingeniería en las centrales térmicas. Además, de lo ya mencionado, se han desarrollado habilidades de búsqueda de información a través de Internet, otros departamentos, redes internas de la empresa, para documentarme y buscar la mejor solución y el mejor diseño para el proyecto.

Los objetivos principales del proyecto, describían una potente herramienta para la empresa, y para el diseño de futuras centrales, pues permitiría detectar errores en el control de los automatismos, antes de la puesta en marcha de las mismas.

A medida que avanzaba el proyecto, iban surgiendo problemas de simulación y diseño, fruto de la poca experiencia con el software, que se intentaban resolver primero por medios propios, y si no era posible, se contactaba con el departamento técnico de EcosimPro. Gracias a esto, finalmente acabaron conociéndose los detalles más técnicos del software.

Una vez adquirida esta experiencia con el software, se comenzó a analizar el papel que desempeñaban los típicos de control en el automatismo de una central térmica y a observar la complejidad interna que conllevan. Sin embargo, al implementar las dos primeras macros, se comenzó a asimilar su estructura y a comprender como cada una de sus señales era necesaria, para gestionar eficazmente la cantidad de información que le llega desde el nivel de campo (instrumentación y actuadores).

Al finalizar las macros, se hubo de implementar el sistema físico, periodo en el cual se conocieron muchos aspectos mecánicos y técnicos, que aunque no son de la especialidad, creo convenientes saber siendo Ingeniero Industrial. El siguiente paso, adaptar el control a este sistema físico, fue una parte muy satisfactoria, pues desde los primeros instantes se obtuvieron resultados que concordaban con la realidad.

Al comprobar como las simulaciones coincidían con las situaciones reales que se dan en una central térmica de ciclo combinado, veía como los objetivos del proyecto principales se iban cumpliendo, y como este trabajo se podría emplear en futuros trabajos de ingeniería en este campo. El hecho de haber ensamblado un sistema mecánico a su correspondiente sistema de control, en el que estaban englobados los típicos de control, y ver como todo funcionaba correctamente, ha sido muy gratificante.

La realización de una interfaz gráfica en Excel, ha ofrecido la oportunidad de conocer aspectos nuevos, en cuanto a la programación con Visual Basic, que eran desconocidos de esta aparentemente sencilla herramienta de Microsoft, pero que ofrece infinitas opciones de diseños para la ingeniería. Con los datos exportados desde EcosimPro, se generaron gráficas y tablas, para ver la evolución en tiempo real del sistema, y comprobar que correspondía a la realidad.

Por último, se resalta el creciente interés por este sector de la ingeniería, en el que han podido ser aplicados conocimientos adquiridos académicamente en la universidad, y en concreto en el campo de la automática y electrónica industrial. Se ha visto el cierre de una etapa, en el que se ha podido llevar a la práctica años de lecciones teóricas, en un proyecto que tendrá un uso real en el mundo de la ingeniería.

8.2 Futuras mejoras y ampliaciones

El objetivo del departamento de instrumentación y control respecto a la ampliación del presente proyecto, no se centra en aumentar lo expuesto en estas páginas sobre el sistema de agua de alimentación de presión intermedia, sino en implementar otros sistemas principales de una central térmica de ciclo combinado e integrarlos todos, para finalmente obtener el funcionamiento completo y real de la central.

Al mismo tiempo, y centrándonos ahora sí, en el sistema de agua de alimentación, como futura ampliación se podría utilizar esta implementación para probar nuevas estrategias y filosofías de control, que permitieran aumentar el rendimiento de la central. También se podrían exportar los lazos de control, y cambiando mínimamente algunos parámetros mecánicos del sistema mecánico implementado, se podría simular el sistema de agua de alimentación completo, o sea el subsistema de media presión y el de alta presión.

En cuanto a la interfaz diseñada en Excel, se podría programar un código más elaborado en Visual Basic, que permitiera un control total y en tiempo real de la simulación. Los datos que conseguimos exportar de las variables de proceso al Excel, podrían aprovecharse para elaborar informes detallados sobre el comportamiento del sistema.

Capítulo 9

Presupuesto y planificación

9.1 Memoria económica

Debido a que este proyecto es experimental y está basado en simulaciones, se realizará un presupuesto basado únicamente en los costes reales de desarrollo del mismo. Cabe destacar los beneficios que este proyecto aportará a la empresa, no sólo en cuestión económica, sino en ahorro de tiempo. Como se ha explicado en capítulos anteriores, constituirá una plataforma en la que poder simular el control real de los sistemas y corregir errores antes de su programación en las pruebas FAT. Por otro lado, es muy complicado valorar los beneficios económicos exactamente que aportará este proyecto, por lo que no se realizarán cálculos de rentabilidad a largo plazo.

La memoria económica consta de las siguientes partes:

- Costes de personal.
- Costes de equipo.
- Costes de material de oficina.
- Costes indirectos.

9.1.1 Costes de personal

En este apartado se analizará el personal que ha formado parte de este proyecto, así como su dedicación temporal y salario estimado.

Personal	Sueldo	Tiempo de dedicación	Total
Alumno que realiza el proyecto (Becario)	5€/hora	11 meses 20 días/mes 3 horas/día	3.960 €
Tutor (Ingeniero Industrial)	30 €/hora	11 meses 10 horas/mes	3.300 €
TOTAL			7.260 €

Tabla 1. Costes de personal

9.1.2 Costes de equipo

Este apartado expondrá los costes del equipo principal, incluyendo licencias software, con que se ha realizado el proyecto. Las licencias de EcosimPro 4.8.0 se han proporcionado en una llave USB, con uso ilimitado de sus funciones, dentro de la duración del proyecto fin de carrera. Para el modelo de PC se ha elegido un modelo estándar de sobremesa, al no hacer falta ordenadores con procesadores múltiples de última generación para los cálculos que debe realizar el software.

Material	Cantidad	Precio	Total
Ordenador personal	1	600 €	600 €
Microsoft Office	1	340 €	340 €
EcosimPro 4.8.0	1	10.000 €	10.000 €
Librería de EcosimPro: FluidaPro	1	10.000 €	10.000 €
TOTAL			20.940 €

Tabla 2. Costes de equipo

9.1.3 Costes de material de oficina

Los costes del material de oficina no han supuesto un gran porcentaje del coste final del proyecto, al haberse realizado el mismo mayoritariamente en el ordenador. Sin embargo, por comodidad, se ha impreso bastante información de partida para facilitar su lectura, y trabajado en ella con material básico de oficina. Por ello estimamos el gasto, entre papel, bolígrafos, y demás material de oficina en unos 100 €

9.1.4 Costes indirectos

Para cuantificar los costes indirectos del proyecto, entre los que se incluyen los gastos relacionados con el consumo de electricidad, climatización, desplazamientos, etc, hemos estimado el mismo en un 10% del porcentaje total del proyecto.

9.1.5 Presupuesto total

Por lo tanto, el presupuesto total del proyecto según se expone en la siguiente tabla es de TREINTA Y UN MIL CIENTO TREINTA EUROS.

Concepto	Cantidad
Coste de personal	7.260 €
Coste de equipo	20.940 €
Coste de material de oficina	100 €
Subtotal	28.300 €
Costes indirectos (10%)	2.830 €
TOTAL	31.130 €

Tabla 3. Presupuesto total del proyecto

9.2 Planificación

En este apartado se describe la planificación temporal que ha seguido este proyecto fin de carrera. Se ha dividido el proyecto en tareas con características comunes y se ha seguido un orden lógico en el desarrollo del mismo. No ha habido contratiempos ni paradas debidas a falta de recursos (licencias, problemas con hardware, etc) y por lo tanto el desarrollo ha sido bastante fluido. Las dudas que han ido surgiendo se han ido resolviendo por parte del tutor y en cuanto a los problemas de software, disponíamos en todo momento de la ayuda del departamento técnico de EcosimPro. La extensión temporal del proyecto abarca desde principios del mes de Noviembre de 2010, hasta comienzos de Septiembre de 2011, prácticamente un año de duración.

El desarrollo del proyecto ha comenzado con la familiarización por mi parte del software EcosimPro. Se han aplicado los conocimientos adquiridos en el curso de formación al que se asistió y utilizando el manual del software, se adquirió la suficiente experiencia para comenzar.

El paso siguiente fue la realización de los típicos de control, bloque principal del proyecto, debido a su importancia para el proyecto como objetivo principal, y su larga duración. A medida que se iban implementando las macros, se iban realizando simulaciones para probar individualmente su funcionamiento.

Una vez se disponía de los típicos de control se realizó el sistema mecánico. Este sistema llevó más tiempo del esperado, pues hubo de aprender a utilizar una librería de EcosimPro con la que no se estaba familiarizado: FluidaPro. Al final el sistema mecánico, se diseñó el sistema de control finalizando así el sistema.

Aunque se habían ido realizando simulaciones durante la realización del proyecto para probar periódicamente que todo funcionaba correctamente, llegó el momento de realizar una serie de simulaciones finales que demostrasen que se habían logrado los objetivos iniciales.

La interfaz en Excel se realizó una vez acabado el trabajo en EcosimPro, y fue un trabajo fluido en el que no encontramos dificultades técnicas al usar un entorno familiar como era el paquete Office.

Por último se realizó la memoria, adaptándose al formato que sugería la universidad, y recopilando toda la información que había servido para la realización del proyecto y redactando el global de la memoria, dejando como últimos puntos las conclusiones obtenidas a lo largo del desarrollo del proyecto.

La siguiente figura muestra de forma esquemática en un diagrama de Gantt, el desarrollo temporal del proyecto y los recursos que se han empleado en cada una de las etapas.

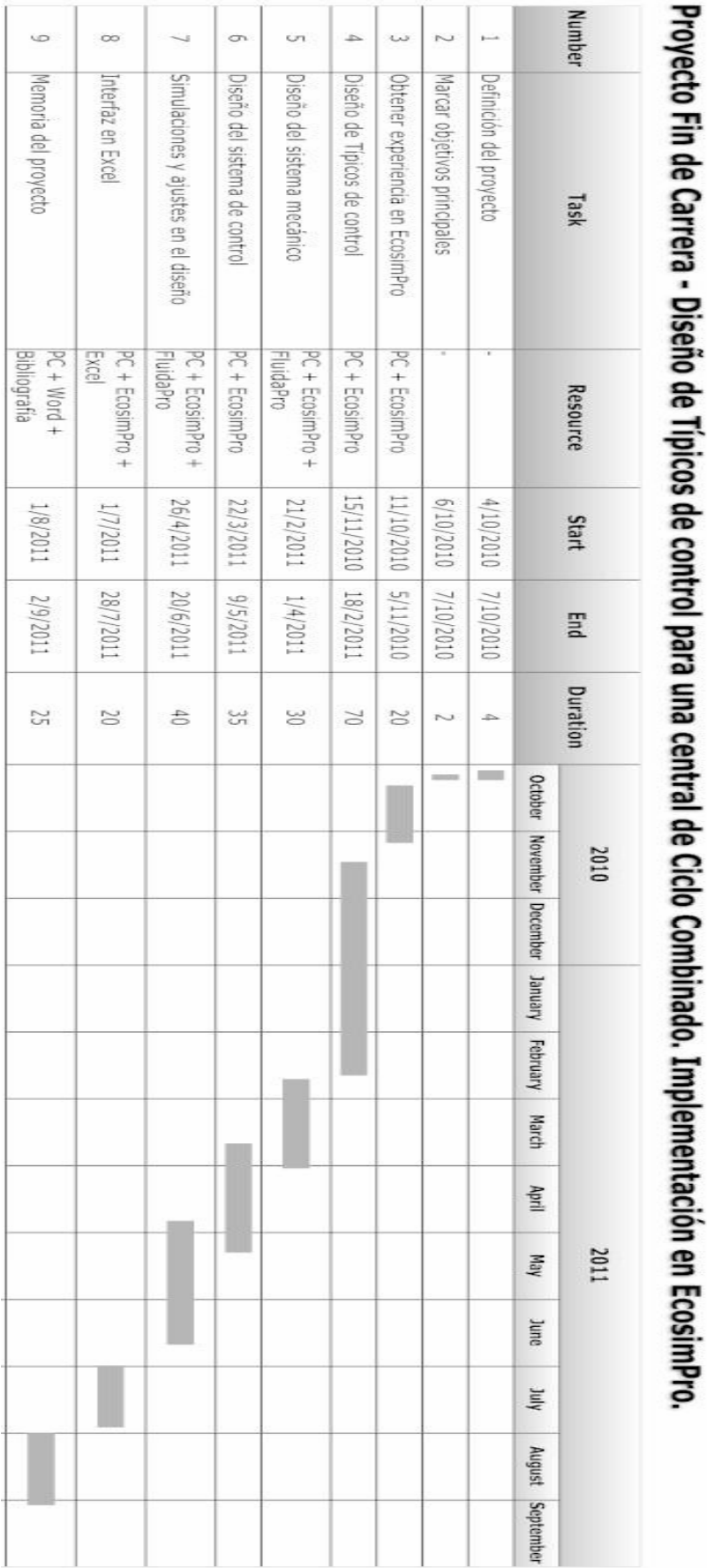


Figura 40. Diagrama de Gantt de la planificación del proyecto

10. Glosario

SCD	<i>Sistema de control distribuido</i>
HRSG	<i>Heat Recovery Steam Generator</i>
MMT	<i>Motor de media tensión</i>
PID	<i>Proporcional Integracional Derivativo</i>
FAT	<i>Factory Acceptance Tests</i>
CCR	<i>Central Control Room</i>
ACK	<i>Acknowledge</i>
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
ERP	<i>Enterprises Resource Plan</i>

Tabla 4. Glosario

11. Referencias

- [1] “La energía y el medio ambiente”. Biblioteca Ben Rosch de divulgación científica y tecnológica.
- [2] *Tien-Chien Chang, Richard A. Wysk, Hsu-Pin Wang*. “Computer-Aided Manufacturing”. Ed. Prentice Hall International series in industrial and systems engineering.
- [3] *Jesus Fraile Mora, Pedro García Gutierrez*. “Instrumentación aplicada a la ingeniería”.
- [4] *Santiago Sabugal García, Florentino Gómez Moñux*. “Centrales térmicas de ciclo combinado. Teoría y proyecto”. Ed. Díaz de Santos
- [5] *Luis Moreno, Santiago Garrido, Carlos Balaguer*. “Ingeniería de Control, modelado y control de sistemas dinámicos”. Ed. Ariel Ciencia
- [6] *Fco. Javier Ceballos*. “Visual Basic .NET. Curso de Programación”. Ed. Ra-Ma
- [7] <http://www.ecosimpro.com/> Página web del software EcosimPro.